Deutscher Bundestag **Drucksache 16/5325**
16. Wahlperiode 10. 05. 2007

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

TA-Vorstudie: Perspektiven eines CO_2- und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Ausschusses

Mobilität und Verkehr sind nicht wegzudenkende Voraussetzungen für das tägliche Leben und Wirtschaften in einem hoch industrialisierten und technisierten Land wie der Bundesrepublik Deutschland. Die Bedeutung des Verkehrsbereichs für Wohlstand und Lebensqualität kann kaum überschätzt werden. Allerdings verursacht der Verkehr auch erhebliche negative Umwelteffekte in Form von Klimagas- und Schadstoffemissionen. Hinzu kommt die hohe Abhängigkeit des Verkehrs von erschöpflichen fossilen Ressourcen. Technologische Möglichkeiten, die einen Beitrag zur Lösung dieser Problemlage leisten können, bestehen sowohl bei der Entwicklung von effizienteren Antriebstechnologien als auch bei der Herstellung und Nutzung von alternativen Kraftstoffen.

Vor diesem Hintergrund hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung im Oktober 2004 beschlossen, das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) im Rahmen einer Vorstudie mit der Untersuchung der technischen Möglichkeiten für einen CO_2- und schadstoffarmen Verkehr zu beauftragen. Ziel des TAB-Projekts war es, einen aktuellen und gut strukturierten Überblick über den gegenwärtigen Stand des Wissens und der Diskussion zu geben.

In dem vorliegenden TAB-Bericht werden ausführlich die Effizienz- und Emissionsminderungspotenziale der Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser, Luft), die technologischen Potenziale bei Antriebstechnologien und -systemen sowie bei Kraftstoffen und Energieträgern analysiert. In einer integrierten Betrachtung werden die Emissionsminderungspotenziale entlang der gesamten technologischen Kette vom „Bohrloch bis zum Rad" („well-to-wheels") dargestellt. Darüber hinaus werden die Mengenpotenziale bzw. der Flächenbedarf für Biokraftstoffe in Deutschland aufgezeigt. Zudem werden der Stellenwert der Importe von Bioenergieträgern und ihre vielfältigen Implikationen sowie Nutzungskonkurrenzen (z. B. mobiler vs. stationärer Sektor) thematisiert. Auf der Grundlage dieses analytischen Überblicks werden der Forschungs- und Förderungsbedarf für neue bzw. weiterentwickelte Technologien angesprochen und der Bedarf an weitergehenden TA-Untersuchungen abgeleitet.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem Bericht des TAB eine aktuelle und umfassende Informationsgrundlage für die zukünftige parlamentarische Befassung mit diesem wirtschafts-, umwelt- und forschungspolitisch bedeutenden Themenfeld.

Berlin, den 12. März 2007

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung

Ulla Burchardt, MdB
Vorsitzende

Axel E. Fischer, MdB
Berichterstatter

Uwe Barth, MdB
Berichterstatter

Hans-Josef Fell, MdB
Berichterstatter

Swen Schulz, MdB
Berichterstatter

Dr. Petra Sitte, MdB
Berichterstatterin

Zusammenfassung

Entgegen dem allgemeinen Trend ist der Verkehrsbereich der einzige Sektor, in dem die CO_2-Emissionen im letzten Jahrzehnt weiter angestiegen sind. Indessen ist die Notwendigkeit der Verminderung des CO_2-Ausstoßes und der Schadstoffemissionen im Verkehr unstrittig. Ansatzpunkte bestehen hierfür zum einen in der Einführung neuer Kraftstoffe und Energieträger zur Substitution von Benzin und Diesel und zum anderen bei der Effizienzsteigerung von Antrieben. Da dem Verkehrsbereich zukünftig eine wichtige Rolle beim Klima- und Ressourcenschutz sowie bei der Erreichung von Luftreinhaltezielen zukommen wird, wurde das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages beauftragt, das Thema „Perspektiven eines CO_2- und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick“ im Rahmen einer Vorstudie zu bearbeiten.

Ziel dieser Vorstudie ist es, die vorhandene aktuelle Literatur zu sichten, auszuwerten und die bisher untersuchten Themenschwerpunkte übersichtlich darzustellen. Zusätzlich wurden zur Quantifizierung von Emissionsminderungspotenzialen und zum Flächenbedarf von Biokraftstoffen weiter gehende Berechnungen durchgeführt. Auf dieser Grundlage werden Forschungslücken identifiziert und Themen vorgeschlagen, die nach Einschätzung des TAB besondere Aufmerksamkeit für weiter gehende vertiefende Analysen verdienen.

Effizienz- und Emissionsminderungspotenziale der Verkehrsträger

Straßenverkehr

Der Straßenverkehr weist nicht nur aufgrund seines Anteils an der gesamten Verkehrsleistung, sondern auch wegen seines bislang erreichten Entwicklungsstandes die größten Potenziale zur Effizienzsteigerung und zur Reduzierung der verursachten Treibhausgase (THG) auf. Deswegen steht er meist im Fokus jeder verkehrlichen Technologiediskussion. Dies zeigen auch die Schwerpunkte der Fachliteratur; die überwiegende Mehrzahl der gesichteten Studien behandelt Technologien zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung im Verkehr aus dem Blickwinkel des Straßenverkehrs. Aus den genannten Gründen folgt auch der vorliegende Bericht weitgehend dieser Betrachtungsweise.

Bahnverkehr

Bahnfahrzeuge werden heutzutage in der Regel mit Elektromotoren oder Dieselmotoren angetrieben. Dabei weisen Elektromotoren heute schon einen relativ hohen Entwicklungsstand mit nur geringen weiteren Einsparpotenzialen auf. Auch die in Bahnfahrzeugen eingesetzten (Groß-)Dieselmotoren haben unter Effizienzkriterien bereits ein hohes Entwicklungsniveau erreicht. Es ist festzustellen, dass die Hersteller aufgrund der geringen Motorenstückzahlen für die bahneigene Entwicklung neuer Antriebstechnologien wenig Anreiz sehen und daher eher Technologien, die sich im Straßenverkehr bewährt haben, mit zeitlichem Abstand auf den Bahnverkehr übertragen.

Zwischen den sehr effizienten Dieselaggregaten und Elektroantrieben mit externer Stromversorgung bestehen für Bahnfahrzeuge wahrscheinlich auch zukünftig nur äußerst schmale Nischen für alternative Antriebstechnologien wie z. B. Brennstoffzellen. Weitere technische Einsparpotenziale liegen vor allem im Bereich der Reduktion der Fahrwiderstände (Roll- und Beschleunigungswiderstand, Aerodynamik) und der Rückgewinnung von Bremsenergie bei Dieselfahrzeugen.

Flugverkehr

Der Flugverkehr weist seit einigen Jahren von allen Verkehrsarten mit Abstand die höchsten Steigerungsraten der Verkehrsleistungen auf. Dieser Trend hält in allen Prognosen auch künftig an. Daher sind Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion und Emissionsminderung im Flugverkehr von hoher Priorität. Gleichzeitig ist aber das Spektrum der hierfür einsetzbaren Technologien begrenzt, was den Problemdruck in diesem Sektor erhöht.

Bei den etablierten Triebwerken existiert ein Zielkonflikt zwischen einer weiteren Steigerung der Turbineneffizienz und der Minimierung der Stickoxidemissionen. Brennstoffzellen sind als alternative Antriebstechnologie im Luftverkehr wegen ihres relativ hohen Gewichts nicht prädestiniert. Zusätzlich entsteht bei Brennstoffzellen als Reaktionsprodukt überwiegend Wasser, was nicht unproblematisch ist. Der Grund ist, dass bestimmte Emissionen (u. a. Wasser) in großer Höhe andere Wirkmechanismen als auf der Erdoberfläche aufweisen. Welche Bedeutung diese sog. „nichtbeständigen Treibhausgase“ für den Treibhauseffekt besitzen, ist wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärt. Die Bewertung der Umwelteigenschaften alternativer Kraftstoffe (z. B. Wasserstoff) im Luftverkehr wird davon maßgeblich abhängen.

Im Vordergrund von Kraftstoffeinsparungen beim Flugzeug standen und stehen der Leichtbau und die Aerodynamik. Weitere Fortschritte beim Leichtbau sind vor allem von der Entwicklung neuer Werkstoffe abhängig.

Schiffsverkehr

Als beherrschende Antriebstechnologie hat sich im Schiffsbetrieb der (Groß-)Dieselmotor durchgesetzt. Er wird in der Binnenschifffahrt mit Diesel, in der Hochseeschifffahrt vor allem mit Schweröl angetrieben, was wegen der hohen Schadstoffemissionen aus Umweltgesichtspunkten keine optimale Lösung darstellt. Aufgrund des für den Schiffsverkehr typischen, quasistationären

Betriebs kann der Motor kraftstoffsparend ausgelegt und nahe dem Betriebsoptimum gefahren werden.

Als Maßnahmen zur Verbesserung bestehender oder Entwicklung neuer Antriebe kommen prinzipiell dieselben Technologien wie für Straßen- und Bahnfahrzeuge infrage. Brennstoffzellen werden heute schon im militärischen Bereich für Schiffsantriebe verwendet. Eine breite Anwendung in der zivilen Schifffahrt ist in den kommenden Jahren aus Kostengründen jedoch fraglich.

Antriebstechnologien und -systeme

Trotz ihres hohen Entwicklungsstandes weisen auch die konventionellen Antriebe – vor allem Otto- und Dieselmotoren – noch ein erhebliches Potenzial zur Weiterentwicklung auf. Darüber hinausgehende Potenziale werden von fortgeschritteneren Technologien wie z. B. Hybrid- und Brennstoffzellenantrieben erwartet.

Ottomotor

Die technischen Möglichkeiten, den spezifischen Kraftstoffverbrauch von konventionellen Ottomotoren zu senken, sind sehr vielfältig. Ottomotoren weisen unter Teillast einen relativ schlechten Wirkungsgrad auf. Viele der Verbesserungen zielen daher darauf ab, den Teillastbetrieb zu optimieren oder aber zu vermeiden.

Kurz- bis mittelfristig einsatzfähige Technologien sind z. B. „downsizing“ mit Aufladung (Turbolader), Direkteinspritzung des Kraftstoffs sowie variable Ventilsteuerung, Zylinderabschaltung und Verdichtung. Jede dieser technischen Maßnahmen hat das Potenzial, zur Kraftstoffreduktion mit einigen wenigen bis zu gut 15 Prozent beizutragen (je nach Fahrzeugart und -größe). Allerdings dürfen die Werte der Einzelmaßnahmen nicht einfach aufsummiert werden, da sie zum Teil das gleiche Minderungspotenzial auf unterschiedliche Art und Weise erschließen.

Neben den konventionellen „Benzinern“ sind heute bereits Ottomotoren im Einsatz, die mit Erdgas, Ethanol oder Wasserstoff betrieben werden können. Die Technik hierfür ist somit im Prinzip vorhanden; deutliche Verbesserungen werden aber zukünftig noch erwartet. Die Einführung dieser Motorenkonzepte hängt auch von der Verfügbarkeit des jeweiligen Kraftstoffs ab. Mit der Einführung von Erdgas- und/oder Wasserstofffahrzeugen muss der Aufbau einer entsprechenden Tankstelleninfrastruktur einhergehen. Für Erdgas als Kraftstoff ist eine flächendeckende Infrastruktur zzt. im Aufbau.

Dieselmotor

Der Dieselmotor wurde bereits in der Vergangenheit auf einen günstigen Verbrauch hin optimiert und hat in dieser Hinsicht einen relativ hohen Entwicklungsstand erreicht. Deutliche Effizienzsteigerungen konnten vor allem durch die elektronische Direkteinspritzung erzielt werden, deren Entwicklung weitestgehend abgeschlossen ist. Bei Dieselmotoren sind in naher Zukunft nur noch geringe Kraftstoffeinsparungen durch weitere Optimierungen schon angewandter Technologien (z. B. Minimierung der Motorreibung, verbesserte Abgasrückführung) zu erwarten.

Mehr noch als bei Ottomotoren existiert bei der Auslegung von Dieselmotoren ein Zielkonflikt zwischen der Steigerung der Energieeffizienz und den zunehmenden gesetzlichen Anforderungen zur Emissionsreduktion der Luftschadstoffe Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickoxide und Partikel.

Konvergenz von Otto- und Dieselmotor

Konventionelle Verbrennungsmotoren, gleich ob Otto oder Diesel, haben ein Grundproblem: Durch den Brennraum läuft eine Flammenfront, die diesen in relativ heiße und kalte Bereiche aufteilt mit negativen Auswirkungen auf die Stickoxid- und Rußemissionen. Ein Ziel ist deshalb, ein homogenes Luft-Kraftstoff-Gemisch an mehreren Stellen im Zylinder selbständig und gleichzeitig ohne Flammenfront und Druckwelle im Zylinder zu entzünden und zu verbrennen. Damit wird der Vorteil des homogenen Luft-Kraftstoff-Gemisches bei Ottomotoren mit dem Selbstzündungsverhalten von Dieselmotoren verbunden. Dieses Verfahren wird homogenisierte Verbrennung (Homogeneous Compression Combustion Ignition, HCCI) genannt. Die Entwicklung dieser Technologie befindet sich gegenwärtig im Stadium von Prüfstandversuchen.

Wechselwirkungen zwischen CO_2-Minderungsmaßnahmen und Schadstoffemissionen

Fahrzeugtechnische Maßnahmen, die der Reduktion von Kraftstoffverbrauch bzw. CO_2-Emissionen dienen, können hinsichtlich der Emissionen von human- und ökotoxischen Schadstoffen kontraproduktiv sein. Umgekehrt kann die Reduktion von Schadstoffen (z. B. Partikelfilter bei Dieselfahrzeugen) zu erhöhtem Verbrauch und einer Steigerung der CO_2-Emissionen führen. Eine Quantifizierung dieser Wechselwirkungen von CO_2- und Schadstoffminderungsmaßnahmen ist jedoch teilweise methodisch schwierig. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

Hybridfahrzeuge

Hybridfahrzeuge kombinieren mehrere Energiewandler und Speichersysteme im Fahrzeug. Typischerweise handelt es sich dabei um Verbrennungs- und Elektromotoren mit Kraftstofftank und Batterie. Die Verbrauchsminderung gegenüber konventionellen Fahrzeugen auf gleichem Entwicklungsstand resultiert im Wesentlichen aus folgenden Eigenschaften des Antriebsstranges bzw. der Betriebsweise:

- Rekuperation, d. h. teilweise Rückgewinnung der (insbesondere im Stadtverkehr häufig anfallenden) Bremsenergie,
- optimaler Betriebsbereich der Verbrennungsmotoren, d. h. Vermeidung der niedrigen Wirkungsgrade im Teillastbereich und Nutzung der höheren Wirkungsgrade im mittleren bis oberen Lastbereich,
- „downsizing“, d. h. kleinere Auslegung der Verbrennungsmaschinen.

Die Schwachstellen des Hybridkonzepts können wie folgt charakterisiert werden:

- Komplexität: Durch die größere Anzahl an Komponenten ergeben sich höhere Kosten für Produktion und Wartung sowie Verluste durch zusätzliche Energieumwandlungen, die die Verbrauchsminderungen reduzieren.
- Gewicht: Das zusätzliche Gewicht der hybridspezifischen Komponenten limitiert die Verbrauchsreduktion gegenüber monovalenten Fahrzeugen.

Insgesamt resultiert bei Hybridfahrzeugen damit eine starke Abhängigkeit der Effizienz vom Fahrprofil: Zwar ergeben sich im Stadtverkehr vergleichsweise hohe Einsparungen. Außerorts sind die Effekte jedoch deutlich kleiner; ggf. können bei hohen Geschwindigkeiten sogar Mehrverbräuche durch das Zusatzgewicht auftreten.

Dennoch ist klar, dass das Hybridkonzept bereits heute zur Emissionsminderung beitragen kann und noch erhebliches Entwicklungspotenzial besitzt. Ein wichtiger zusätzlicher Vorteil aller Hybride besteht in der Möglichkeit, vollständig emissionsfrei zu fahren (limitiert durch die Batteriekapazität), etwa in stark belasteten Gebieten wie z. B. im innerstädtischen Bereich.

Brennstoffzellenfahrzeuge

Brennstoffzellenfahrzeuge gelten als zukunftsweisendes Fahrzeugkonzept. Sie befinden sich in der Entwicklungsphase; Serienfahrzeuge existieren bislang nicht. In Bezug auf den eingesetzten Brennstoff können drei Konzepte unterschieden werden:

- Reinwasserstoff (gespeichert als Flüssig- oder Druckwasserstoff),
- Erzeugung eines wasserstoffhaltigen Brenngases an Bord aus Methanol oder Kohlenwasserstoffen („onboard reforming“) und
- Direktumsetzung von Methanol in speziellen Brennstoffzellen.

Unter Effizienzaspekten ist Wasserstoff der Brennstoff der Wahl; problematisch sind allerdings die Speicherung an Bord und die fehlende H_2-Infrastruktur. Wasserstoffspeicher sind deutlich schwerer und um ein Vielfaches teurer als Tanks für Methanol oder Benzin.

Entwicklungsbedarf besteht bei allen Komponenten, vor allem unter dem Aspekt der Kostensenkung. Die FuE von Brennstoffzellen findet zum großen Teil im Bereich der Materialwissenschaften (z. B. neue Membranmaterialien für Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen) statt. Eine nennenswerte Marktdurchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird – nachdem die Euphorie der 1990er Jahre deutlich abgekühlt ist – gegenwärtig frühestens in 15 bis 20 Jahren erwartet.

Technologische Potenziale für Verbrauchssenkung und Emissionsminderung

Um die technologischen Potenziale zur Verbrauchssenkung, d. h. die Effekte fahrzeugseitiger Maßnahmen besser illustrieren zu können, wurden Technologiepakete definiert und zu sechs Beispielkonfigurationen zusammengefasst, deren Minderungen quantifiziert wurden:

- Konventionell: Dies ist ein Fahrzeug, bei dem zusätzlich zu einer deutlichen Verringerung der Fahrwiderstände (Gewicht, Roll-, Luftwiderstand) eine Palette von antriebsseitigen Weiterentwicklungen eher konventioneller Natur realisiert ist.
- Milder Hybrid: Dieses Fahrzeug wird von einem Hybridmotor mit einem kleineren elektrischen Aggregat angetrieben.
- Vollhybrid: Dieser unterscheidet sich vom milden Hybrid durch eine größere Dimensionierung des elektrischen Antriebs.
- Konzept: Dies ist ein visionäres Fahrzeug, bei dem eine extreme Reduktion der Fahrwiderstände mit optimierten Antrieben verknüpft wurde.
- Konzepthybrid: Bei diesem Fahrzeug kommt zusätzlich ein Hybridantrieb zum Einsatz.
- H_2-BZ: Dies ist ein Fahrzeug mit einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle.

Das Ergebnis in nachfolgender Übersicht zeigt, dass sich schon bei der Ausschöpfung „konventioneller“ Maßnahmen beträchtliche Effizienzpotenziale erschließen lassen. Die größten Reduktionen unter den marktnahen Konfigurationen ergeben sich aber für Hybridkonzepte, dort besonders für Vollhybride. Für die Konzept-PKW und Brennstoffzellen-PKW ergeben sich deutlich niedrigere Verbräuche als für die konventionellen und Hybridneuzulassungen in 2020.

Der Einfluss, den die verschiedenen optimierten Technologiekonfigurationen auf den Gesamtverbrauch der Fahrzeugflotte ausüben können, ist allerdings entscheidend von deren Marktdurchdringung abhängig. Das heißt, dass für deutlichere Reduktionen vor allem die hohen Potenziale noch eher visionärer Konzepte erforderlich sind und/oder eine wesentlich schnellere Marktdurchdringung relativ ausgereifter Maßnahmen.

TECHNOLOGISCHE POTENZIALE ZUR VERBRAUCHSSENKUNG VON BEISPIELKONFIGURATIONEN

Konfiguration	Otto-PKW Verbrauch 2004	Otto-PKW Änderung[1] 2010	Otto-PKW Änderung[1] 2020	Diesel-PKW Verbrauch 2004	Diesel-PKW Änderung[1] 2010	Diesel-PKW Änderung[1] 2020	BZ[2] 2020
PKW-Mix[3]	236			223			
konventionell	–	-54	-61	–	-43	-51	–
milder Hybrid	–	-50	-55	–	-47	-54	–
Vollhybrid	–	-74	-79	–	-68	-74	–
Konzept	–	–	-95	–	–	-92	–
Konzepthybrid	–	–	-116	–	–	-111	–
H_2-BZ	–	–	–	–	–	–	-124

alle Angaben in MJ/100 km
1 Neuzulassung in 2010 bzw. 2020 bezogen auf den PKW-Mix 2004
2 BZ: Brennstoffzellen-PKW; Reduktion bezogen auf Otto-PKW
3 gesamte PKW-Flotte nach Fahrleistungsanteilen der Größenklassen gewichtet

Alternative Kraftstoffe: ökologische und ökonomische Betrachtung

Derzeit werden international und national schwerpunktmäßig etwa zehn verschiedene alternative Kraftstoffe mit einer Vielzahl möglicher Erzeugungswege in Kombination mit verschiedenen Antriebstechnologien (wie optimierte konventionelle Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen) bezüglich ihrer potenziellen Beiträge zu einer nachhaltigeren Mobilität diskutiert. Im Fokus der Diskussion liegen neben den konventionellen marktgängigen Biokraftstoffen (Biodiesel, Ethanol aus Zucker/Stärke sowie Biogas) vor allem die Biokraftstoffe, die derzeit in der Entwicklungsphase sind (v. a. Biomass-to-Liquid(BtL)-Kraftstoffe, Ethanol aus Holz, Stroh o. Ä.) sowie Wasserstoff.

Konventionelle Biokraftstoffe

– Für die konventionellen Biokraftstoffe Biodiesel (in Deutschland vorwiegend aus Raps hergestellt), Bioethanol aus Getreide, Mais und Zuckerrüben sowie Biogas sind die Technologien zur Herstellung nahezu ausgereift; Optimierungspotenziale bieten vor allem noch die Reduzierung des Düngemitteleinsatzes, die Ertragssteigerung je Hektar und die Verwertung der bei der Kraftstoffherstellung anfallenden Koppelprodukte.

Datenlage: Die Energie- und Treibhausgasbilanzen und die Kosten variieren in der Literatur sehr stark vor allem aufgrund der Annahmen zur landwirtschaftlichen Produktion und der Berücksichtigung der anfallenden Koppelprodukte. Es gibt nur wenige Veröffentlichungen, die die Herstellung von Biogas als Kraftstoff bilanzieren. Je nachdem, ob als Rohstoff Reststoffe oder Anbaubiomasse verwendet wird, können Energie-, Treibhausgas- und Kostenbilanz stark variieren.

Treibhausgasbilanz: Grundsätzlich gilt, dass die Treibhausgasbilanzen von Rapsmethylester und Ethanol aus Weizen oder Zuckerrübe unter Berücksichtigung der direkten Verbrennung des Kraftstoffs im Vergleich mit den Referenzkraftstoffen Diesel und Benzin deutlich günstiger ausfallen, wenn die Koppelprodukte nutzbar sind. Bei optimierter Koppelproduktnutzung können die Treibhausgasemissionen nochmals deutlich gemindert werden. Die Bilanz für Biogas aus Reststoffen ist trotz der eher dürftigen Datenlage als sehr günstig einzuschätzen.

Kosten: Die Herstellung von Biodiesel und Ethanol ist im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen deutlich kostenintensiver und auch 2010 voraussichtlich nicht unter 20 bis 40 Euro/GJ zu realisieren. Biogas aus Reststoffen ist mit etwa 15 bis 34 Euro/GJ vergleichsweise günstiger. Bei Energiepflanzen scheinen 2-Kulturen-Systeme (Feuchtgutlinien) besonders günstig abzuschneiden.

Biokraftstoffe in der Entwicklungsphase

Perspektivisch interessant sind vor allem Bioethanol aus holzartigen Ausgangsstoffen (Zellulose) und synthetische Kraftstoffe aus der Biomassevergasung (Biomass-to-Liquid, BtL). Zwar ist in den nächsten zehn bis 15 Jahren nicht damit zu rechnen, dass es zu einer nennenswerten Durchdringung des Kraftstoffmarktes mit diesen synthetischen Kraftstoffen kommt. Sie bieten aber aufgrund des im Vergleich zu konventionellen Biokraftstoffen unspezifischen Ausgangsmaterials und der Möglichkeit, Pflanzen als Ganzes zu nutzen, erhebliche Potenziale für die Zukunft. Demonstrationsvorhaben zeigen, dass weiterer verfahrenstechnischer Entwicklungsbedarf besteht, bevor diese Route zur Kraftstoffbereitstellung wirtschaftlich beschritten werden kann. Zu beachten ist, dass für die

Rohstoffbereitstellung eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Biomasselogistik aufgebaut werden muss.

Datenlage: Es existieren kaum Veröffentlichungen zur Bilanzierung der Energie- und Treibhausgasemissionen für diese noch in der Entwicklungsphase befindlichen Biokraftstoffpfade.

Treibhausgasbilanz: Grundsätzlich ist auf Basis der vorhandenen Konzeptstudien und Demonstrationsvorhaben zu erwarten, dass sowohl der Energieverbrauch als auch die Treibhausgasemissionen deutlich unter die der konventionellen Biokraftstoffe gesenkt werden können.

Kosten: Die in den verschiedenen Veröffentlichungen dargestellten Kosten variieren erheblich, sodass kein einheitliches Bild abzuleiten ist. Es wird aber allgemein erwartet, dass die Kosten zukünftig deutlich sinken werden. Verschiedentlich werden Kosten von um die 9 Euro/GJ im Jahr 2010 für möglich gehalten.

Wasserstoff

Die Herstellung von Wasserstoff als Kraftstoff in tiefkalt verflüssigter Form oder komprimiert gasförmig ist auf der Basis nahezu aller Primärenergieträger möglich. Die benötigten Technologien sind in den meisten Fällen bereits entwickelt bzw. kommerziell verfügbar. Die Herstellung kann sowohl in zentralen Großanlagen als auch dezentral an den Tankstellen erfolgen.

Datenlage: Die Herstellungspfade von Wasserstoff sind hinsichtlich Energiebedarf und Treibhausgasemissionen vergleichsweise gut untersucht. Weitere Umweltwirkungen (z. B. Versauerungs- und Ozonbildungspotenzial) sind hingegen wenig bis überhaupt nicht untersucht worden. Die existierenden Kostendaten zu den einzelnen Kraftstoffpfaden sind noch sehr wenig belastbar.

Treibhausgasbilanz: Die Treibhausgasbilanz von Wasserstoff hängt entscheidend von der eingesetzten Primärenergie ab. Potenziale für CO_2- und emissionsarme Kraftstoffpfade zur Herstellung von Wasserstoff basieren vor allem auf erneuerbaren Energieträgern. Die (potenziell großen) Treibhausgasreduktionspotenziale bei der Dampfreformierung von Erdgas und Vergasung von Kohle hängen von der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit der CO_2-Abscheidung und Lagerung ab. Generell hat die Herstellung von tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff, die vor allem durch ökonomische Erwägungen gefördert wird, gegenüber der komprimierten Form unter Klimagesichtspunkten Nachteile durch die hohen energetischen Aufwendungen bei der Verflüssigung.

Kosten: Trotz aller Unsicherheiten weisen die nach dem heutigen Stand des Wissens verfügbaren Daten höhere Kosten im Vergleich zu vielen Biokraftstoffen aus. Die kostengünstigste Variante mit hohen Emissionsminderungspotenzialen stellt die direkte Vergasung von Biomasse dar. Die Potenziale sind vergleichbar mit denen der elektrolytischen Wasserstoffherstellung mit regenerativ erzeugtem Strom, die jedoch mit höheren Kosten verbunden ist.

Infrastrukturanforderungen: Für die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff ist eine wichtige Voraussetzung für die Diffusion entsprechender Fahrzeuge ein flächendeckendes Netz von Wasserstofftankstellen. Für die Lösung des Problems, ob zuerst das Tankstellenangebot geschaffen werden muss, um die Nachfrage nach Wasserstoff anzukurbeln, oder ob die Nachfrage nach Wasserstoff das Angebot an Tankstellen induzieren kann, gibt es aus heutiger Sicht keinen Königsweg. Am ehesten könnte es sich in der Praxis wohl dadurch lösen lassen, dass durch ein zeitlich eng verzahntes und den Marktphasen angepasstes Investitionsverhalten und Förderinstrumentarium ein jeweils marktfähiges Gleichgewicht erreicht wird. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass in der Pilot- und Einführungsphase Flottenbetreibern eine Schlüsselrolle zukommen könnte.

Die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur wäre zum heutigen Zeitpunkt verfrüht, da einige Technologieentscheidungen mit Schlüsselbedeutung noch nicht getroffen sind bzw. getroffen werden können, z. B. die Art der Speicherung von Wasserstoff im Fahrzeug. Daher sind eine verstärkte internationale Kooperation in Forschung und Entwicklung, die Weiterentwicklung von Infrastrukturkonzepten sowie von Normen und Standards unverzichtbar.

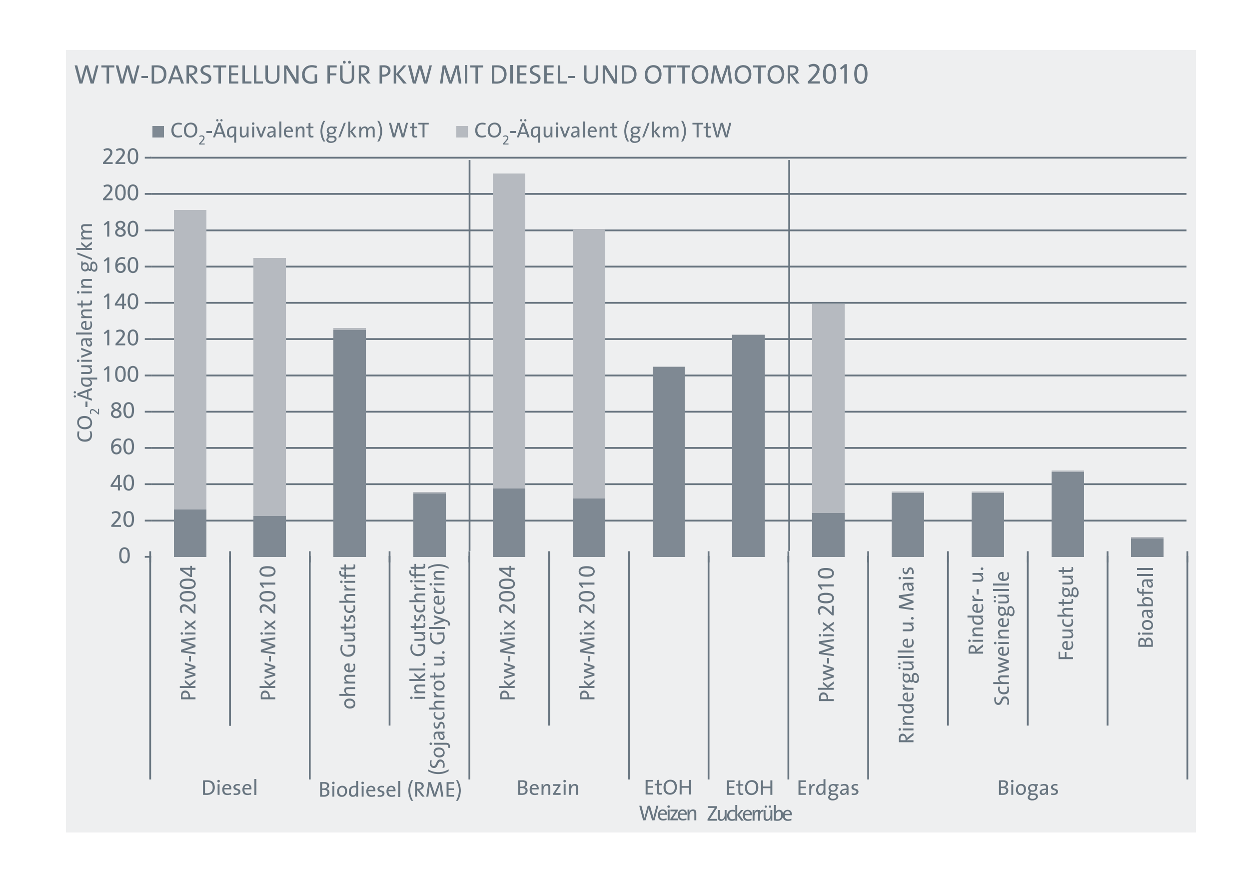
Emissionsminderungspotenziale Well-to-Wheels

Zur Quantifizierung der technologischen Emissionsminderungspotenziale des Verkehrssektors ist eine integrierte Betrachtung erforderlich, die die Potenziale bei der Kraftstoffbereitstellung (Well-to-Tank, WtT) und diejenigen im Fahrzeug selbst (Tank-to-Wheels, TtW) zu einer Well-to-Wheels(WtW)-Perspektive zusammenführt. Im Gegensatz zur Literatur, in der diese Diskussion meist anhand eines willkürlich gewählten Referenzfahrzeugs geführt wird, wird im vorliegenden Bericht der gesamte Fahrzeugpark in den Bezugsjahren 2010 und 2020 abgebildet.

WtW-Betrachtung 2010

Einige Ergebnisse der WtW-Betrachtung für das Jahr 2010 zeigt die Übersicht, in der die Emissionen von CO_2-Äquivalenten je gefahrenem Fahrzeugkilometer für eine Reihe von Motor/Kraftstoffkombinationen dargestellt sind.

Es wird deutlich, dass aufgrund der im Trend unterstellten Effizienzmaßnahmen die Treibhausgasemissionen der konventionell angetriebenen PKW verglichen mit dem Basisjahr 2004 um etwa 14 Prozent abnehmen. Wie bereits erwähnt, zeigt sich auch die starke Abhängigkeit der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen von der Anrechnung von Gutschriften in deren Vorketten. Besonders auffällig ist dies im Falle von Biodiesel (Rapsmethylester, RME), dessen Minderungspotenzial je nach Nutzung der Koppelprodukte gegenüber der Nutzung von fossilem Dieselkraftstoff zwischen 20 und 80 Prozent liegen kann. Insgesamt zeigt sich, dass auch die konventionellen Biokraftstoffe (RME und Bioethanol auf Basis von Weizenkörnern oder Zuckerrüben) in jedem Fall einen Vorteil gegenüber den fossilen Kraftstoffen bezüglich der Treibhausgasemissionen aufweisen.



Unter Aspekten der Treibhausgasminderung sehr interessant erscheint in diesem Fall Biogas, das aus Gülle, einer Mischung von Gülle und Mais oder aber auch aus Bioabfall oder Feuchtgut (2-Kulturen-Systeme) hergestellt werden kann. Gegenüber Erdgas fossilen Ursprungs kann z. B. aus Bioabfall hergestelltes methanreiches Gas die Treibhausgasemissionen um rund 90 Prozent mindern.

WtW-Betrachtung 2020

Unter den hier betrachteten Rahmenbedingungen und Annahmen zur technologischen Entwicklung resultiert eine Minderung der Treibhausgasemissionen allein durch Effizienzverbesserung des durchschnittlichen PKWs im Jahr 2020 bezogen auf das Basisjahr 2004 von etwa 25 Prozent. Bei Einsatz eines auf minimalen Verbrauch hin optimierten Konzepthybrid-PKWs kann die Minderung der Treibhausgasemissionen um weitere 25 Prozent gesteigert werden.

Aufgrund von Lernkurveneffekten bei der Herstellung von Biokraftstoffen sind auch die Treibhausgasemissionen (WtW) bei Nutzung von konventionellen Biokraftstoffen im Jahr 2020 niedriger als im Jahr 2010. Besonders günstig schneiden die Biokraftstoffe der sog. „zweiten Generation“ ab, die sich momentan noch in der Entwicklungsphase befinden, 2020 aber voraussichtlich einen Beitrag zum Kraftstoffmarkt in Deutschland leisten werden. Mit diesen Kraftstoffen sind Minderungen der Treibhausgasemissionen von über 80 Prozent gegenüber den fossilen Energieträgern möglich. Bei Anrechnung von Koppelprodukten, z. B. dem Stromüberschuss bei der Herstellung von FT-Diesel, sind in einigen Fällen sogar negative Treibhausgasemissionen möglich. Auch im Jahr 2020 erscheinen verschiedene Herstellungspfade von Biogas mit Treibhausgasminderungen von 65 bis 90 Prozent gegenüber Erdgas interessant.

Die WtW-Bilanzierung für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge hängt entscheidend von der Herkunft des Wasserstoffs ab. Es zeigt sich, dass – aufgrund der hohen Emissionen in der Kraftstoffvorkette – aus Erdgas bereitgestellter Wasserstoff keinen signifikanten Treibhausgasvorteil gegenüber den herkömmlichen fossilen Kraftstoffen aufweist. Wird Wasserstoff über Elektrolyse auf der Basis des europäischen Strommixes erzeugt und dann in Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt, so fällt die Bilanz gegenüber der Nutzung von fossilen Kraftstoffen und konventionellen Verbrennungsmotoren eindeutig negativ aus. Wird der Wasserstoff dagegen aus regenerativem Strom per Elektrolyse hergestellt, so hat er vergleichsweise niedrige Treibhausgasemissionen. Hier ist jedoch zu beachten, wie weiter unten ausgeführt, dass die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom zum Antrieb von Fahrzeugen in Konkurrenz zum stationären Sektor steht.

Falls die CO_2-Abscheidung technisch so weit optimiert werden kann, dass sie auch unter ökonomischen Gesichtspunkten konkurrenzfähig ist, und ausreichend Speicherkapazitäten für die Deponierung zur Verfügung stehen, könnten auch die Wasserstoffpfade „Reformierung von Erdgas“ und „Kohlevergasung“ für die Erreichung

von Klimaschutzzielen im Verkehrsbereich interessant werden.

Biokraftstoffe – Mengenpotenzial und Flächenbedarf

Neben der technologischen Einsatzreife, den spezifischen Emissionsminderungspotenzialen und den Kosten von Biokraftstoffen ist die Frage, welche Menge von Biokraftstoffen auf der vorhandenen Fläche hergestellt werden kann, zur Gesamtbewertung ihrer Relevanz für die Substitution fossiler Kraftstoffe und das Erreichen von Klimaschutzzielen von maßgeblicher Bedeutung.

Ausgehend von Grundannahmen zum landwirtschaftlichen Ertrag und Wirkungsgraden der einzelnen Herstellungsverfahren einschließlich Steigerungen aufgrund von Lernkurveneffekten werden in einigen Szenarien die Flächenbedarfe berechnet, die sich bei der Substitution einer bestimmten Menge fossiler Kraftstoffe ergeben.

Eine Maximalbetrachtung verdeutlicht, dass eine Fläche von über 18 Mio. ha benötigt würde, um den gesamten Kraftstoffbedarf des PKW-Sektors 2010 durch konventionelle Biokraftstoffe (RME, Bioethanol aus Weizen) zu decken. Dies ist offensichtlich durch heimische Produktion nicht zu realisieren. Als unter umweltpolitischen Restriktionen maximal verfügbare Anbaufläche für Energiepflanzen in Deutschland im Jahr 2010 werden in der Literatur etwa 1,6 Mio. ha angegeben.

Der Flächenbedarf, um das vorläufige EU-Ziel von 10 Prozent Biokraftstoffanteil im Jahr 2020 zu realisieren, läge beim Einsatz von RME und Bioethanol auf Weizenbasis bei 1,6 Mio. ha. Damit wären Treibhausgasminderungen von etwa 7 Mio. t/a verbunden. Würde das EU-Ziel durch Biokraftstoffe der sog. zweiten Generation realisiert, betrüge der Flächenbedarf zur Substitution von Dieselkraftstoff 1,1 Mio. ha, wenn BtL aus Holz von Kurzumtriebsplantagen zum Einsatz käme. Der Flächenbedarf von Bioethanol aus Lignozellulose kann hier nicht quantifiziert werden, da die notwendigen Daten nicht zur Verfügung stehen. Die Treibhausgasminderungen würden sich auf etwa 12,3 Mio. t/a belaufen.

Erweiterung der Ressourcenbasis durch Importe

Aus den Analysen zu den Mengenpotenzialen von Biokraftstoffen wird klar, dass bei anspruchsvollen Mengenzielen der resultierende Flächenbedarf beträchtlich ist. Somit erscheint die Option interessant, neben den heimischen Potenzialen zur Bereitstellung von Biomasse für die energetische Nutzung auch exogene Potenziale durch Importe von Bioenergieträgern (Brenn- und Kraftstoffe) zu nutzen.

In Europa liegen beispielsweise erhebliche und bislang ungenutzte Potenziale in Polen und Rumänien. Noch wesentlich umfangreicher erscheinen die Importpotenziale aus Schwellen- und Entwicklungsländern. Die globalen Bioenergiepotenziale liegen aufgrund der klimatischen Bedingungen und der Flächenverfügbarkeit zu einem erheblichen Anteil – mindestens 50 Prozent – in heutigen Schwellen- und Entwicklungsländern.

Unter Nachhaltigkeitsaspekten ist dabei wesentlich, dass mögliche Exporte von Biokraftstoffen nicht zu Nachteilen für die Umwelt (z. B. Urwaldrodung, Umwandlung von extensiven Flächen zu Bioenergieplantagen) oder sozialen Problemen (z. B. Enteignung oder Vertreibung) führen und die Nahrungsmittelsicherheit nicht nachteilig beeinflusst wird.

Erste Studienergebnisse z. B. der Welternährungsorganisation (FAO) weisen in die Richtung, dass kein direkter Zusammenhang zwischen möglichen Bioenergieimporten aus Entwicklungsländern und der Ernährungssicherheit besteht. Wünschenswert wäre allerdings die Entwicklung von verbindlichen Kriterien für die „Nachhaltigkeit“ von Biokraftstoffexporten aus Entwicklungsländern.

Nutzungskonkurrenzen

In Studien zur Nutzung von Biokraftstoffen erfolgen Potenzialbetrachtungen oft in der Art, dass 100 Prozent der verfügbaren Biomasse dem Kraftstoffsektor zugeordnet werden. Bei einer solchen Vorgehensweise werden Nutzungskonkurrenzen außer Acht gelassen, die auf verschiedenen Ebenen wirksam sind. Nutzungskonkurrenzen sind geprägt durch Zielkonflikte und z. T. sich widersprechende Restriktionen einerseits und durch das Verhältnis zwischen – begrenzten – Ressourcen (Potenzialen) und Nachfrage andererseits.

Nutzungszwecke von Flächen

Eine grundlegende Konkurrenzsituation besteht darin, dass unterschiedliche Nutzungsformen – z. B. Land- und Forstwirtschaft, Siedlung und Verkehr sowie Natur- und Landschaftsschutz bzw. Erholung – um die vorhandene Fläche konkurrieren. Kommen neue Nutzungsansprüche – wie der Anbau von Energiepflanzen für Biokraftstoffe – hinzu oder verändern sich die Nutzungsmuster, können sich die Nutzungskonkurrenzen verschärfen. Die Bestimmung der Fläche, die für den Biomasseanbau zur Verfügung steht, ist damit methodisch insofern schwierig, als Abwägungen über die Priorität der verschiedenen Nutzungsansprüche erfolgen müssen (z. B. Biomasse vs. Naturschutz).

Mobil oder stationär?

Eine weitere fundamentale Konkurrenzsituation liegt in der Frage begründet, welcher Nutzung die gewonnene Biomasse bzw. der erzeugte Strom zugeführt werden soll: Ist die Nutzung im Verkehrsbereich oder die im stationären Sektor zu bevorzugen? Geeignete Kriterien zur umweltökonomischen Bewertung sind hier die erzielbaren CO_2-Minderungen und die Vermeidungskosten.

Unbestritten ist, dass die rohstoffliche Nutzung von Biomasse prioritär sein sollte, da sie in der Nutzungskette der Stoffe quasi vorgeschaltet werden kann. Vorausgesetzt, dass die Materialien nach der stofflichen Nutzungsphase in logistisch unaufwendiger Form erfasst und gesammelt werden können, sind sie daran anschließend energetisch bzw. als Kraftstoff nutzbar.

Bei der Bewertung, ob die mobile oder stationäre Nutzung (also z. B. Umwandlung von Holz zu BtL-Diesel oder Verbrennung von Holzpellets zur Wärme- und Stromerzeugung) zu bevorzugen ist, kommen die meisten aktuellen Studien in der Tendenz zum Ergebnis, dass die stationäre Nutzung unter dem Blick der Treibhausgasvermeidungskosten effizienter ist als die Biomassenutzung im mobilen Sektor. Ebenso wird die Einspeisung erneuerbaren Stroms in das Netz als effizienter eingeschätzt als die Herstellung von Wasserstoff via Elektrolyse für den mobilen Einsatz. Allerdings kann eine belastbare Aussage zu den zukünftigen Treibhausgasvermeidungskosten durch „stationäre“ oder „mobile“ Nutzung ohne eine detaillierte Modellierung konsistenter Szenarien mit entsprechenden Mengengerüsten, Kostenentwicklungen und Berücksichtigung von Sättigungseffekten nicht getroffen werden.

Prioritärer Untersuchungsbedarf für die Technikfolgenabschätzung

Aus dem in diesem Bericht herausgearbeiteten Gesamtüberblick über den gegenwärtigen Wissens- und Diskussionsstand in den Themenbereichen Verkehrsträger und Antriebstechnologien sowie Kraftstoffe wurde eine Reihe von untersuchungsbedürftigen Fragestellungen identifiziert, die nach Einschätzung des TAB besondere Aufmerksamkeit verdienen, da sie einerseits für die Realisierung von Emissionsminderungen im Verkehrsbereich zentrale Bedeutung besitzen und andererseits erhebliche Forschungslücken in diesen Feldern zu konstatieren sind. Prioritärer Untersuchungsbedarf wird auf folgenden Gebieten gesehen:

Verkehrsträger und Antriebstechnologien

– Potenziale zur Emissionsminderung der Verkehrsträger Schiene, Wasser, Luft

– Problembereich Güterverkehr – technologische Potenziale

Kraftstoffe

– Biokraftstoffe der sog. zweiten Generation (Well-to-Wheels-Analysen)

– CO_2-Abscheidung und -Lagerung bei der Herstellung von Kraftstoffen

– Importe von Biokraftstoffen

– Globale Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen

– Einführungsstrategien für alternative Kraftstoffe

I. Einleitung

Der Verkehrsbereich besitzt eine enorme ökonomische und ökologische Bedeutung. Einerseits nimmt er eine Schlüsselstellung für Handel und Wirtschaft ein und ist selbst ein bedeutender Wirtschaftssektor. Zudem sind Mobilität und Verkehr nicht wegzudenkende Voraussetzungen für die Lebensstile in unserer hochindustrialisierten und technisierten Gesellschaft.

Andererseits gehen vom Verkehrsbereich erhebliche Umweltwirkungen aus: Bei den Emissionen sowohl von Treibhausgasen als auch von Luftschadstoffen spielt Deutschlands Verkehrssektor eine gewichtige Rolle. Mit einem Anteil von 20 Prozent (Bezugsjahr 2002) liegt er bei den gesamten CO_2-Emissionen an zweiter Stelle hinter dem Kraftwerkssektor (Abbildung 1). Es ist der einzige Sektor, dessen CO_2-Emissionen in der Dekade ab 1990 noch gestiegen sind. Erst in den letzten Jahren ist ein geringfügiger Rückgang eingetreten.

Auch bei den Luftschadstoffen ist der Verkehr ein wesentlicher Verursacher von Emissionen. So beträgt sein Anteil an den Gesamtemissionen bei Stickoxiden (NO_x) über 50 Prozent, bei Kohlenmonoxid 46 Prozent, bei Staub immerhin 17 Prozent. Lediglich bei Schwefeldioxid (SO_2) ist der Anteil des Verkehrs mit weniger als 1 Prozent marginal (BMWA 2005). Diese Situation könnte sich in Zukunft weiter verschärfen, da prognostiziert wird, dass die Verkehrsleistungen in Deutschland bis zum Jahr 2020 im Trend erheblich wachsen werden: im Personenverkehr um 28 Prozent und besonders stark im Güterverkehr mit einer Steigerung von 66 Prozent (jeweils bezogen auf 1997). Für die CO_2-Emissionen des motorisierten Verkehrs würde dies eine Steigerung um 13 Prozent bedeuten (TAB 2002).

Darüber hinaus ist der Verkehrsbereich in hohem Maße abhängig vom absehbar knapp werdenden Energieträger Erdöl, dessen weltweit größte Reserven sich in politisch höchst instabilen Regionen befinden.

Ausgehend von dieser Bestandsaufnahme wird klar, dass dem Verkehrsbereich zukünftig eine zunehmend wichtige Rolle in der Energie- und Umweltpolitik zukommt, wenn man das Erreichen von Klimaschutz- und Luftreinhaltungszielen ernsthaft anstrebt. Nennenswerte Lösungsbeiträge werden von technologischen Weiterentwicklungen im Bereich der Antriebssysteme und Verkehrsträger und insbesondere von der Einführung alternativer Kraftstoffe in den Verkehrssektor erhofft.

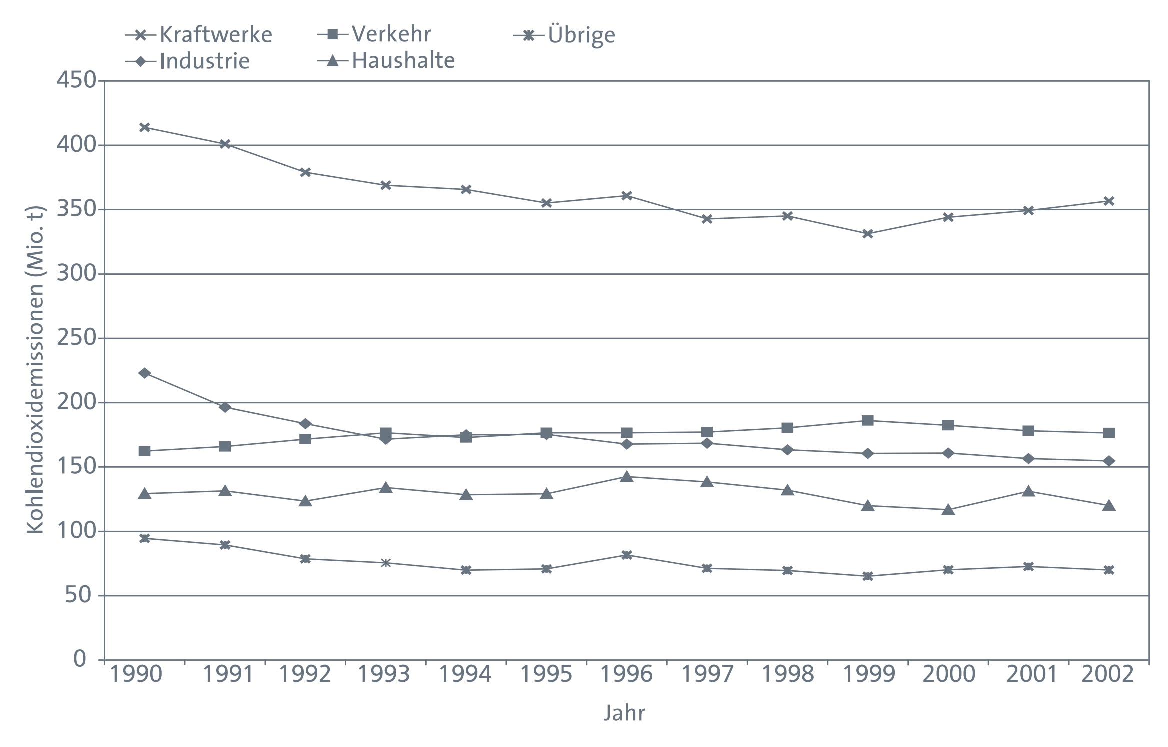
Vor diesem Hintergrund hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung im Oktober 2004 beschlossen, das TAB im Rahmen einer Vorstudie mit der Untersuchung der technischen Möglichkeiten für einen CO_2- und schadstoffarmen Verkehr zu beauftragen.

Mit dieser Fragestellung hat sich in jüngster Zeit eine außerordentlich große Anzahl von Forschungsvorhaben, Pilotprojekten und anderen Aktivitäten beschäftigt, die zu den unterschiedlichsten Ergebnissen gekommen sind. Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Themenfeld aufgrund der Vielzahl und Heterogenität der aktuellen Projekte durch eine enorme Unübersichtlichkeit charakterisiert ist. Ziel des TAB-Projekts ist es daher, einen aktuellen, umfassenden und strukturierten Überblick über den gegenwärtigen Stand des Wissens und der Diskussion auf der Basis einer Analyse der relevanten verfügbaren Publikationen zu geben.

Abbildung 1



CO_2-Emissionen in Deutschland nach Sektoren



Quelle: eigene Darstellung, Daten aus BMWA 2005

Der Bericht ist folgendermaßen aufgebaut: In Kapitel II werden Zielsetzung und methodisches Vorgehen erläutert. Kapitel III beschäftigt sich mit den Effizienz- und Emissionsminderungspotenzialen der Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser, Luft). In Kapitel IV werden Antriebstechnologien und -systeme im Hinblick auf technologische Weiterentwicklungen für verringerte Treibhausgasemissionen (Tank-to-Wheels) untersucht. Kraftstoffe und Energieträger und deren Herstellungspfade (Well-to-Tank) sind der Gegenstand von Kapitel V. In Kapitel VI werden die Emissionsminderungspotenziale integriert (Well-to-Wheels) betrachtet. Es folgt in Kapitel VII eine Untersuchung des Mengenpotenzials bzw. des Flächenbedarfs für Biokraftstoffe in Deutschland. In Kapitel VIII werden Importe von Bioenergieträgern und ihre vielfältigen Implikationen diskutiert. Nutzungskonkurrenzen (also z. B. mobiler vs. stationärer Sektor) werden in Kapitel IX beleuchtet. In Kapitel X werden die Infrastrukturanforderungen für alternative (v. a. gasförmige) Kraftstoffe dargelegt. In Kapitel XI wird der Forschungs- und Förderungsbedarf für neue bzw. weiterentwickelte Technologien angesprochen, wie er nach Einschätzung des TAB besteht. Aus den Ergebnissen der vorstehenden Kapitel wird zum Abschluss in Kapitel XII der Bedarf an weiter gehenden Untersuchungen für die Technikfolgenabschätzung abgeleitet.

Während die Kapitel III bis V sowie VIII bis X einen strukturierten Überblick über den Stand der Fachdiskussion auf der Grundlage einer intensiven Analyse der verfügbaren Literatur bieten, gehen vor allem die Kapitel VI (WtW-Analysen) und VII (Mengenpotenzial für Biokraftstoffe), für die eigene Simulationen und Berechnungen mithilfe der Analysetools TREMOD und GEMIS durchgeführt wurden, über den publizierten Wissensstand hinaus.

Der vorliegende Bericht stützt sich wesentlich auf die im Rahmen dieses Projekts vergebenen Gutachten:

– „Perspektiven eines CO_2- und emissionsarmen Verkehrs – Arbeitsteil: Verkehrsträger und Antriebstechnologien“ des IFEU (Institut für Energie und Umweltforschung GmbH) Heidelberg, Autoren: Dr. U. Höpfner, H. Helms, U. Lambrecht, Dr. A. Patyk, C. Reuter
– „Perspektiven eines CO_2- und emissionsarmen Verkehrs – Arbeitsteil: Kraftstoffe und Infrastruktur“ des Öko-Instituts e.V., Berlin, Autoren: Dr. W. Zimmer, C. Hochfeld, U. Fritsche, W. Jenseit, M. Schmied
– „Potenziale zur Minderung von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen: Integrierte Betrachtung von Kraftstoffen und Antrieben“, erstellt durch die Arbeitsgemeinschaft Öko-Institut/IFEU, Autoren: Dr. W. Zimmer, U. Fritsche, C. Hochfeld, Dr. U. Höpfner, W. Knörr, Dr. A. Patyk

Die Verantwortung für die Auswahl und Strukturierung der darin enthaltenen Informationen sowie ihre Zusammenführung mit weiteren Quellen liegt bei den Autoren

des vorliegenden Berichts. Den Gutachtern sei an dieser Stelle nochmals ausdrücklich für die Ergebnisse ihrer Arbeit, die gute Zusammenarbeit und die ausgeprägte Bereitschaft zu inhaltlichen Diskussionen gedankt.

Ein herzlicher Dank geht an dieser Stelle auch an die Herren Dieter Bockey (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., UFOP), Dr. Axel Friedrich (Umweltbundesamt, UBA), Andreas Gruber und Christian Gruber (MAN), Prof. Dr.-Ing. Bernd Höhlein, Albert Kobbe (BGW – Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V.), Dr. Joachim Nitsch (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR), Jaco Reijerkerk (Linde AG), Patrick Schnell (Total Deutschland GmbH), Peter Schrum (Bundesverband Biogene Kraftstoffe e.V., BBK), Thomas Siegmund (Bundesinitiative BioEnergie, BBE) und Dr. Hans Weidner (Adam Opel AG), die im Rahmen eines Reviewprozesses die Gutachten kritisch gegengelesen und mit ihren Anmerkungen und Anregungen wertvollen Input für die Erstellung dieses Berichts geliefert haben.

II. Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Der Themenbereich „emissionsarmer Verkehr“ steht in den letzten Jahren im Zentrum von vielfältigen und intensiven Forschungsanstrengungen der Technikbewertung, Ökobilanzen und Lebenszyklusanalysen. Der Umfang der verfügbaren Literatur und die Erscheinungsfrequenz von neuen Publikationen sind beachtlich. Auf der anderen Seite sind die verschiedenen Ergebnisse aufgrund von unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen, divergierenden Grundannahmen und methodischen Differenzen teilweise schwer vergleichbar. Es lässt sich daher konstatieren, dass das Themenfeld aufgrund der Vielzahl und Heterogenität der aktuellen Projekte und Publikationen durch eine enorme Unübersichtlichkeit charakterisiert ist.

Ziel des TAB-Projekts war es daher, einen aktuellen, umfassenden und strukturierten Überblick über den gegenwärtigen Stand des Wissens und der Diskussion zu geben. Zu diesem Zweck sollten

– alle relevanten Studien identifiziert, gesichtet und strukturiert werden, in denen das Themenfeld „CO_2- und emissionsarmer Verkehr“ behandelt wurde,

– eine Charakterisierung der Studien hinsichtlich ihrer Schwerpunktsetzung, Methodik etc. vorgenommen werden, sowie

– eine synoptische Darstellung und vergleichende Analyse der verschiedenen Annahmen und Ergebnisse erstellt werden.

Diese Schritte wurden zunächst jeweils getrennt für die Bereiche „Verkehrsträger und Antriebstechnologien“ (Tank-to-Wheels, TtW) und „Kraftstoffe und Energieträger“ (Well-to-Tank, WtT) durchgeführt, um technologische Einzelpotenziale beleuchten und diskutieren zu können. Im Anschluss wurden die WtT- und TtW-Ergebnisse in eine integrierte Well-to-Wheels(WtW)-Betrachtung zusammengeführt.

Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes

Inhaltliche Abgrenzung

In diesem Bericht stehen die Analyse und Bewertung von Antriebstechnologien und Kraftstoffen bzw. Energieträgern im Hinblick auf ihre Potenziale zur Emissionsminderung im Mittelpunkt. Diese technologiezentrierte Perspektive impliziert, dass beispielsweise weder veränderte Verhaltensweisen und Lebensstile oder die Möglichkeiten der Siedlungs- und Verkehrsplanung und ihre Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage noch politische und rechtliche Rahmenbedingungen sowie Instrumente und Maßnahmen zur CO_2-Reduktion im Verkehr (s. hierzu z. B. TAB 2002 u. UBA 2003a) Gegenstand der Untersuchungen sind.

Des Weiteren konzentriert sich die Darstellung auf die Nutzungsphase der Fahrzeuge. Das heißt, dass der Ressourcenverbrauch und die Emissionen bei Produktion und Nachnutzung (Recycling, Entsorgung) der Fahrzeuge im Rahmen dieses Berichts nicht behandelt werden. Schließlich liegt der Schwerpunkt der Analysen auf dem Bereich Straßenverkehr. Dies ergab sich zum einen aus der Literaturauswertung, da für die anderen Verkehrsträger (Bahn, Schiff, Flugzeug) technologieübergreifende Vergleichsstudien praktisch nicht vorliegen. Zum anderen begründet sich dies aus der dominierenden Rolle, die der Straßenverkehr bei der Emission von Treibhausgasen und Luftschadstoffen einnimmt.

Regionaler und zeitlicher Bezug

Der Fokus der Untersuchungen liegt auf Deutschland mit den hier geltenden Rahmenbedingungen und Voraussetzungen. Betrachtet werden ausschließlich Antriebstechnologien und alternative Kraftstoffpfade, die für den deutschen Markt von Relevanz sind. Da sowohl die Fahrzeugindustrie als auch die Kraftstoffbereitstellung international organisiert sind, war jedoch an den entsprechenden Stellen der „Blick über den Tellerrand“ sinnvoll. So wird z. B. die mögliche Rolle von Importen alternativer Kraftstoffe thematisiert.

Bei der Literaturanalyse wurde jeweils qualitativ herausgearbeitet, wie sich die unterschiedlichen regionalen Schwerpunktsetzungen (Europa, USA) mit entsprechend differierenden Grundannahmen in den Ergebnissen bemerkbar machen. Der Versuch, die Studien quantitativ zu vergleichen, musste dagegen wegen der Heterogenität und – teilweisen – Intransparenz der zugrunde gelegten Annahmen leider aufgegeben werden.

Der zeitliche Rahmen orientiert sich an den verfügbaren Studien (s.u.). Der heutige Stand der Technik wird mit Bezug auf das Basisjahr 2004 diskutiert. Daneben werden kurzfristig umsetzbare technologische Maßnahmen – markiert durch das Zieljahr 2010 – und mittelfristig verfügbare Potenziale (2020 und später) analysiert. Es werden also z. B. nur Kraftstoffe betrachtet, deren Herstellung und Distribution bis 2020 so weit technisch entwickelt sind bzw. sein können, dass sie das Pilotstadium überschritten haben und für einen breiteren Einsatz zur Verfügung stehen werden.

Analyseparameter

Um die Perspektiven eines CO_2- und emissionsarmen Verkehrs aufzeigen zu können, werden folgende Analyseparameter verwendet:

Fossiler Energieverbrauch: Der Verbrauch der Energieressourcen kann durch einen Indikator, der den Energieaufwand zur Bereitstellung und Nutzung eines Produkts beschreibt, dargestellt werden. Als wesentlicher Parameter wird hier der fossile Energiebedarf betrachtet. Viele Studien beziehen sich auf den gesamten Primärenergieverbrauch, der je nach Verfahrenstechnik und Verwendung der Koppelprodukte auch regenerative Energien mit beinhalten kann. Die Ergebnisse dieser Studien werden zwar textlich erwähnt, jedoch nicht in die tabellarischen Übersichten aufgenommen.

Treibhausgasemissionen: Der Leitindikator bei der Bewertung der Umwelteigenschaften ist der Ausstoß an Treibhausgasen (bilanziert als Kohlendioxidäquivalente). Darin enthalten sind neben Kohlendioxid- vor allem die Methan- und Lachgasemissionen, deren treibhausrelevante Wirkung entsprechend ihrem sogenannten „global warming potential“ (GWP) berücksichtigt wird.

Weitere Umweltwirkungen: Als weitere Umweltauswirkungen werden die Luftschadstoffemissionen betrachtet. Die Kraftstoffvorketten werden damit hinsichtlich der Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung, Ozonabbau und Ozonbildungspotenzial ausgewertet. Für die Parameter Öko- und Humantoxizität ist die Fahrzeugnutzung maßgeblich, v. a. bei Stickoxid- und Partikelemissionen. Diese konnten aus methodischen Gründen im Rahmen dieses Berichts nicht in voller Breite untersucht werden, werden aber im Hinblick auf Wechselwirkungen und Zielkonflikte zwischen CO_2-Minderungsmaßnahmen und Schadstoffemissionen diskutiert.

Kosten: Der Einbezug der Kostenseite neben den Umweltauswirkungen ist sinnvoll, da nur so die ökologisch und ökonomisch sinnvollsten Technologieoptionen (z. B. Kraftstoffpfade) identifiziert werden können. Angaben zu Kosten variieren jedoch in der Literatur teilweise erheblich aufgrund unterschiedlicher Rohstoffpreise, betrachteter Verfahren und anderer zum Teil spekulativer Annahmen. Die Literaturauswertung im Rahmen dieser Studie zeigt die Bandbreiten der derzeit diskutierten Kosten auf.

Methodisches Vorgehen

Zunächst wurde die umfangreiche verfügbare Literatur systematisch gesichtet und ausgewertet. Im Anschluss daran wurde eine Anzahl technologieübergreifender Vergleichsstudien aufgrund ihrer grundlegenden Bedeutung und ihres „impact“ auf die aktuelle wissenschaftliche Diskussion des Themengebiets ausgewählt. Dies sind für den Bereich Verkehrsträger und Antriebstechnologien:

– Argonne 2002, CARB 2004, DoE 2000, GM 2002, GM 2005, IFEU 2003a, IFEU 2005b, Kolke 2004, MIT 2003b, NESCCAF 2004, OECD/IEA 2005, RAND Europe et al. 2003, Ricardo 2003

Und für den Bereich Kraftstoffe und Energieträger:

– CONCAWE 2003 sowie die späteren Aktualisierungen, IFEU 2004b, Kraftstoffmatrix 2004, Öko-Institut 2004b, VIEWLS 2005

Einen Überblick über die in der herangezogenen Basisliteratur untersuchten Schwerpunkte gibt Tabelle 1. Eine Kurzcharakterisierung der Publikationen findet sich in Anhang 3.

Diese Publikationen wurden detailliert vergleichend ausgewertet und punktuell durch Ergebnisse aus Veröffentlichungen zu Einzeltechnologien angereichert. Die Ergebnisse dieser Literaturauswertung haben sich vor allem in den Kapiteln III bis V niedergeschlagen.

Berechnung von WtW-Szenarien

Für eine Gesamtbewertung der Potenziale zur Kraftstoffeinsparung und Emissionsminderung ist eine Zusammenführung der WtT- und TtW-Perspektiven in eine integrierte Betrachtung Well-to-Wheels (WtW) erforderlich. Hierfür wurden, über eine reine Literaturanalyse hinausgehend, Szenarien entwickelt und quantitative Berechnungen auf der Basis der Datenbanken bzw. Softwaretools TREMOD 4.0 (IFEU 2005c) und GEMIS 4.3 durchgeführt.

Review

Da in diesem sehr aktiv beforschten Feld die veröffentlichte Literatur möglicherweise den aktuellen Stand der Diskussion nicht adäquat widerspiegelt, wurde aktuelles Expertenwissen aus der Industrie, Verbänden und wissenschaftlichen Einrichtungen einbezogen. Zu diesem Zweck und mit dem Ziel, die Ergebnisse der im Rahmen dieses TAB-Projekts in Auftrag gegebenen Gutachten (IFEU 2005a, Öko-Institut 2005a, Öko-Institut/IFEU 2006) zu verifizieren und zu validieren, wurde eine Reihe von renommierten Experten eingeladen, an einem Reviewprozess mitzuwirken. Aktiv teilgenommen haben:

– Dieter Bockey (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., UFOP)

– Dr. Axel Friedrich (Umweltbundesamt, UBA)

– Andreas Gruber und Christian Gruber (MAN)

– Prof. Dr.-Ing. Bernd Höhlein

– Albert Kobbe (Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V., BGW)

– Dr. Joachim Nitsch (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)

– Jaco Reijerkerk (Linde AG)

– Patrick Schnell (Total Deutschland GmbH)

– Peter Schrum (Bundesverband Biogene Kraftstoffe e.V., BBK)

– Thomas Siegmund (Bundesinitiative BioEnergie, BBE)

– Dr. Hans Weidner (Adam Opel AG)

Tabelle 1

Analyseschwerpunkte in der herangezogenen Basisliteratur

Quelle	Analyseebene			Fahrzeuge			Antriebe		Kraftstoffe				Untersuchungsumfang					
	WtW	WtT	TtW	PKW	LNF	LKW	konv.	Hybr.	BZ	Erdgas	Bio	H_2	Energie	CO_2	Schadst.	Kosten	Raum	Zeit
Argonne 2002			x	x	x	x	x						x			x	USA/Kann.	2015
CARB 2004			x	x	x		x							x				
CONCAWE 2003	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x		x	EU15	2010
GM 2002	x				x		x	x	x	x	x	x	x	x			Europa	2010
GM 2005	x				x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	USA	2010
IFEU 2003a			x	Straße, Schiene, Wasser									x					
IFEU 2004b	x	x									x		x	x	x	x		2010
IFEU 2005b			x			x							x					
Kolke 2004	x			x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	D	2010
Kraftstoffmatrix 2004	x									x	x	x		x		x	D	2010, 2020
MIT 2003b	x						x	x	x				x	x		x	USA	2020
NESCCAF 2004			x	x										x		x	USA	2009–2012
OECD/IEA 2005			x	x									x				OECD	
Öko-Inst. 2004b		x		x							x		x	x	x	x	D	2010–2030
RAND Europe et al. 2003			x		x								x				Europa	2010–2015
Ricardo 2003	x			x			x	x	x			x	x	x		x	Europa	2020, 2030
DoE 2000			x			x							x	x			USA	2010
VIEWLS 2005	x										x		x	x		x	Europa	–/+ 2010

III. Effizienz- und Emissionsminderungspotenziale der Verkehrsträger

Die gängigen Verkehrsträger – Straße, Schiene, Wasser und Luft – haben aufgrund ihrer jeweiligen Eigenheiten sehr unterschiedliche technologische Potenziale zur Emissionsminderung und zur Steigerung der Effizienz des Kraftstoff- bzw. Energieeinsatzes. Die Einsatzmöglichkeiten bestimmter Technologien, deren Umsetzungsreife und Marktpotenziale determinieren diese Potenziale weitgehend.

Selbstverständlich gibt es beträchtliche Unterschiede zwischen den Verkehrsträgern auch bei den aktuellen Emissionsfaktoren (z. B. CO_2-Emissionen pro Personenkilometer). Daher besteht eine mögliche Strategie zur Emissionsminderung in der Veränderung der Zusammensetzung der Verkehrsleistung („Modal Split“) weg von ineffizienteren Verkehrssystemen (Straßenverkehr, Flugzeug) hin zu effizienteren Verkehrssystemen (Bahn, Schiff). Aufgrund der hier vorliegenden Schwerpunktsetzung auf technologische Potenziale, kann auf diese Diskussion aber nicht näher eingegangen werden. Die folgenden Ausführungen basieren wesentlich auf dem Gutachten IFEU (2005a).

Im Folgenden wird dem motorisierten Straßenverkehr größere Aufmerksamkeit gewidmet als dem übrigen Verkehr. Denn zum einen besitzt der Straßenverkehr den größten Anteil an der gesamten Verkehrsleistung in Deutschland sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr (über 80 Prozent bzw. mehr als 60 Prozent im Bezugsjahr 1997 [BVU et al. 2001]). Entsprechend lassen sich absolute Minderungen der Umwelteinwirkungen am ehesten dort realisieren.

Daneben bieten Kraftfahrzeuge mit ihrem relativ hohen spezifischen Energieverbrauch immer noch zahlreiche Möglichkeiten zur Optimierung des Antriebs und der Fahrwiderstände und sind auch prinzipiell für neue Antriebstechnologien geeignet. Andere Verkehrsträger wie die Bahn oder das Flugzeug können demgegenüber nur noch in Teilbereichen verbessert und nur sehr schwer mit neuen Antriebstechnologien ausgerüstet werden. Beispielsweise wird die Bahn schon heute mit sehr effizienten Elektro- und Dieselmotoren angetrieben und verfügt mit dem Rad-Schiene-System über einen kaum noch zu verbessernden Rollwiderstand. Das Flugzeug des zivilen Luftverkehrs wird auf absehbare Zeit mit Turbinen betrieben, ein anderes Antriebskonzept ist hier vorläufig nicht in Sicht. Im Schiffsbetrieb wird der Dieselmotor noch auf absehbare Zeit der beherrschende Antrieb bleiben, und es ist nur mit geringen technisch bedingten, spezifischen Reduktionen der verursachten Treibhausgase zu rechnen.

1. Straßenverkehr

Der Straßenverkehr weist nicht nur aufgrund seines Anteils an der gesamten Verkehrsleistung, sondern auch wegen seines bislang erreichten Entwicklungsstandes die größten Potenziale zur Effizienzsteigerung und zur Reduzierung der verursachten Treibhausgase auf. Deswegen steht er meist im Fokus jeder verkehrlichen Technologiediskussion. Dies zeigen auch die Schwerpunkte der Fachliteratur; die überwiegende Mehrzahl der gesichteten Studien behandelt Technologien zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung im Verkehr aus dem Blickwinkel des Straßenverkehrs. Aus den genannten Gründen folgt auch der vorliegende Bericht weitgehend dieser Betrachtungsweise. Demzufolge werden in Kapitel 4 diese Themenbereiche detailliert analysiert:

- Verbesserungen an konventionellen Motoren (Otto bzw. Diesel)
- Hybridantrieb (Verbrennungsmotor plus Elektromotor)
- Elektromotor mit Batterie
- Elektromotor mit Brennstoffzelle
- Nichtmotorische Verbesserungen des Antriebsstranges
- Verbesserung der Nebenverbraucher
- Reduktion der Fahrwiderstände

2. Bahn

Bahnfahrzeuge werden heutzutage in der Regel mit Elektro- oder Dieselmotoren angetrieben. Die erbrachte Verkehrsleistung der Dieseltraktion beträgt in Deutschland allerdings für den Personen- und Güterverkehr insgesamt nur ca. 12 Prozent (IFEU 2005c).

Die Elektrotraktion wird aufgrund verschiedener Eigenschaften (energieeffizient, abgasfrei, ein Energiespeicher an Bord des Fahrzeugs ist nicht erforderlich) auf absehbare Zeit die dominierende Antriebsart im Bahnwesen bleiben. Dabei weisen Elektromotoren heute schon einen relativ hohen Entwicklungsstand mit nur geringen weiteren Einsparpotenzialen auf. Für gewisse (Nischen-)Anwendungen, wie z. B. den Rangierbetrieb, oder für nichtelektrifizierte Strecken wird die Dieseltraktion auch in Zukunft bestehen bleiben. Noch mehr als beim Straßenverkehr gilt, dass (Groß-)Dieselmotoren unter Effizienzkriterien bereits ein hohes Entwicklungsstadium erreicht haben, prinzipiell aber alle in Kapitel IV beschriebenen Maßnahmen zur Verbesserung von Dieselmotoren auch im Bahnwesen ergriffen werden können. Darüber hinaus kann im Eisenbahnbetrieb eine genauere Anpassung der Motoren an das Lastprofil vorgenommen werden. Allerdings ist festzustellen, dass die Hersteller aufgrund der geringen Motorenstückzahlen für die bahneigene Entwicklung neuer Antriebstechnologien wenig Anreiz sehen und daher eher Technologien, die sich im Straßenverkehr bewährt haben, auf den Bahnverkehr übertragen. Dass diese Technologien – wenn auch zeitlich versetzt – tatsächlich für den Bahnverkehr nutzbar gemacht werden, ist absehbar, da der Energieverbrauch für Eisenbahnverkehrsunternehmen einen beträchtlichen Kostenfaktor darstellt und diese daher entsprechenden Druck auf die Hersteller ausüben.

Alternative Antriebe

Die DB AG erprobte bis vor einiger Zeit den Einsatz einer Erdgaslok im Münchener Hauptbahnhof, die den Anforderungen eines Alltagsbetriebes Stand hielt. Ob ein ökonomisch wie ökologisch sinnvoller Betrieb möglich ist, muss die Auswertung des Pilotversuchs zeigen.

Auch Brennstoffzellen ließen sich langfristig prinzipiell für den Bahnbetrieb auslegen. Verlässliche Aussagen über mögliche Einsparpotenziale von Brennstoffzellen für den Bahnverkehr liegen bislang allerdings nicht vor. Zwischen den sehr effizienten Diesel- und Elektroantrieben mit externer Stromversorgung, letztere auch lokal emissionsfrei, bestehen wahrscheinlich auch zukünftig nur äußerst schmale Nischen für Brennstoffzellen in Bahnfahrzeugen. Prinzipiell könnten ähnliche Brennstoffzellentypen eingesetzt werden, wie sie für Schiffe entwickelt wurden (siehe unten). Gegenwärtig scheint es auf diesem Gebiet Entwicklungsaktivitäten nur in Japan zu geben. Hier hat kürzlich der Bahnkonzern JR East angekündigt, Mitte des Jahres den weltweit ersten Zug mit Brennstoffzellenantrieb in den Testbetrieb zu nehmen (DWV 2006).

Beim Einsatz von Erdgas und anderen alternativen Treibstoffen sind vor allem bei Loks im Langstreckeneinsatz die Volumina der mitzuführenden Tanks und Platzprobleme ein Hemmnis.

Reduktion der Fahrwiderstände

Weitere technische Einsparpotenziale bei Eisenbahnfahrzeugen liegen vor allem im Bereich der Reduktion der Fahrwiderstände (Roll- und Beschleunigungswiderstand, Aerodynamik) und der Rückgewinnung (Rekuperation) von Bremsenergie bei Dieselfahrzeugen. Während der Rollwiderstand des Rad-Schiene-Konzepts schon sehr gering ist und wenig Raum für Optimierungen bietet, liegen im Bereich des Leichtbaus und der optimierten Aerodynamik noch ungenutzte Einsparpotenziale.

Leichtbau kann bei Eisenbahnfahrzeugen über die grundsätzlich wirkenden Maßnahmen (vgl. Kap. IV.10) hinaus mit folgender eisenbahnspezifischer Technologie realisiert werden. Bei den sogenannten Jacobs- und anderen innovativen Drehgestellen teilen sich im Gegensatz zu konventionellen Triebwagen je zwei Wagen ein Drehgestell (Abbildung 2). Somit kann die Anzahl der Drehgestelle bzw. die Fahrzeugmasse verringert und der fahrzeugspezifische Energieverbrauch um 2 bis 5 Prozent reduziert werden. Unter der Annahme einer 5- bis 20prozentigen Flottendurchdringung ist mit einem Einsparpotenzial von 1 bis 2 Prozent über die gesamte Fahrzeugflotte zu rechnen (UIC 2005).

Da der Luftwiderstand vor allem im Hochgeschwindigkeitsverkehr einen großen Anteil des gesamten Energieverbrauchs ausmacht, wird dort schon seit Längerem auf die Aerodynamik geachtet. Die Prinzipien einer optimierten Aerodynamik sind dabei schon seit Längerem bekannt, neueste Computersimulationen unterstützen jedoch den kosteneffizienten Entwicklungsprozess und führen in letzter Zeit auch zu einer zunehmenden Anwendung (z. B. beim ICE 3: optimierte Triebkopfform, optimierte Stromabnehmer).

Abbildung 2

Verschiedene Drehgestellkonfigurationen von Triebwagen

Quelle: IFEU 2005a (MU = Multiple Unit)

Rückspeisung von Bremsenergie

Die Energierückspeisung ist bei Elektrofahrzeugen heute Standard. Der Elektromotor arbeitet beim Bremsen als Generator und speist unter bestimmten Voraussetzungen elektrische Energie in die Oberleitung zurück. Bei Dieselfahrzeugen ist die Rückspeisung von Bremsenergie nur möglich, wenn eigens dafür Energiespeicher an Bord mitgeführt werden. Prinzipiell kommen hierfür Schwungräder, Kondensatoren und Batterien in Betracht. Bislang kommt die Rekuperation von Bremsenergie für Beschleunigungszwecke bei Dieselfahrzeugen nur im LIREX (Leichter und Innovativer RegionalExpress) der DB AG zum Einsatz. Die Einsparpotenziale für Einzelfahrzeuge werden im Bereich von 2 bis zu 10 Prozent bewertet (UIC 2005).

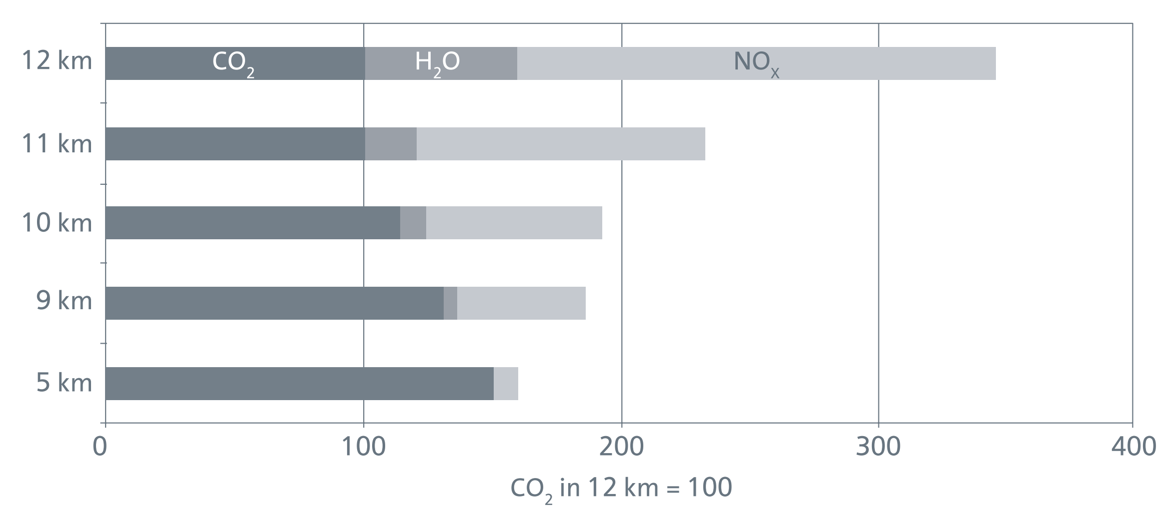
3. Flugverkehr

Beim Flugverkehr weisen bestimmte Emissionen aufgrund der Emission in großer Höhe andere Wirkmechanismen als auf der Erdoberfläche auf. Neben den im Verkehrssektor sonst relevanten, beständigen Treibhausgasen CO_2, CH_4 und N_2O, bei denen es keine Rolle spielt, wo und wann sie emittiert werden, können im Flugverkehr vor allem Stickoxide sowie Wasserdampf, aber auch Partikel und Aerosole in Abhängigkeit von der Flughöhe zum Treibhauseffekt beitragen (Abbildung 3).

NO_x ist selbst kein Treibhausgas, aber eine sogenannte Vorläufersubstanz, die zur Ozonbildung beiträgt. Ozon ist u. a. auch ein Treibhausgas, dessen Wirkpotenzial allerdings schwer mit den beständigen Treibhausgasen zu vergleichen ist, da sowohl seine Konzentration als auch seine Wirkung vom Ort, der Höhenlage und der Jahreszeit abhängen. Der sonst unschädliche Wasserdampf hat ebenfalls ein Treibhauspotenzial. In den unteren Schichten der Troposphäre übt er jedoch einen relativ geringen Einfluss auf den Treibhauseffekt aus, da er dort durch Wolkenbildung und Regen rasch ausgewaschen wird. Mit

Abbildung 3

Relative Wirkung bestimmter Abgase für den Treibhauseffekt in Abhängigkeit von der Flughöhe



Quelle: IPCC 1999, nach IFEU 2005a

zunehmender Höhe verstärkt sich der Effekt allerdings, u. a. weil Wasserdampf die Bildung von Kondensstreifen unterstützt. Kondensstreifen, die als linienförmige Wolken am Himmel sichtbar sind, bilden sich in einer ausreichend kalten Luft durch die warmen und feuchten Wasserdampfemissionen des Luftverkehrs. Auch Partikel und (Sulfat-)Aerosole haben im Luftverkehr durch ihre absorbierenden und streuenden Eigenschaften Einfluss auf den Treibhauseffekt (Öko-Institut 2004a). Insgesamt sind die Auswirkungen dieser höhenabhängigen, nichtbeständigen Treibhausgase noch nicht abschließend bekannt und derzeit Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung und Diskussion.

Turbinen

Größere Passagierflugzeuge werden heutzutage meist mit kerosinbefeuerten Turbinentriebwerken ausgerüstet. Diese besitzen gegenüber anderen Antriebstechnologien den entscheidenden Vorteil, dass sie bezogen auf die abgegebene Leistung ein sehr geringes Gewicht (inkl. des mitzuführenden Kraftstoffs) besitzen. In der Vergangenheit wurde die Effizienz von Triebwerken vor allem durch die Erhöhung der Verbrennungstemperaturen und -drücke realisiert. Eine derartige Auslegung der Triebwerke hat allerdings eine Zunahme der NO_x-Emissionen zur Folge. Somit existiert heute ein Zielkonflikt zwischen einer weiteren Steigerung der Triebwerkseffizienz und der Minimierung der NO_x-Emissionen. Eine neue Generation von Triebwerken mit Abgaswärmetauschern soll diesen Konflikt zumindest teilweise auflösen. Beim sog. Wärmeaustauschertriebwerk, das auf einem Kreisprozess mit Zwischenkühlung sowie einer Energierückgewinnung über einen Wärmetauscher im Abgasstrahl des Triebwerks basiert, werden thermische Wirkungsgrade, die über denen von konventionellen Triebwerken liegen, und eine gleichzeitige Verringerung der CO_2- und NO_x-Emissionen von bis zu 20 bzw. 40 Prozent möglich. Mit der Anwendung dieser Technologie ist frühestens in etwa zehn Jahren zu rechnen (MTU 2002).

Theoretisch können Turbinen auf eine Vielzahl verschiedener Treibstoffe (z. B. Compressed Natural Gas, CNG, oder H_2) angepasst werden. Einschränkend wirken hier zunächst vor allem das Gewicht und das Volumen des mitzuführenden Treibstoffs bzw. seines Speichers, ferner die notwendige Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit. Kurzfristig sind diese Hemmnisse voraussichtlich nicht zu überwinden: „In der Antriebsforschung wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff frühestens in 50 Jahren konkurrenzfähig auf den Markt kommt, sodass erst langfristig über das Konzept wasserstoffgetriebener Flugzeuge entschieden werden dürfte“ (UBA 2003a). Darüber hinaus verursachen die Treibstoffe CNG und Wasserstoff bei ihrer Verbrennung gegenüber Kerosin zwar geringere spezifische CO_2-Emissionen, rufen jedoch höhere Wasserdampfemissionen hervor, die in großer Höhe ausgestoßen möglicherweise problematisch sind. Die Bewertung alternativer Kraftstoffe im Luftverkehr wird unter Umweltgesichtspunkten maßgeblich von den Emissionen nichtbeständiger Treibhausgase und deren noch nicht gänzlich geklärten Bedeutung für den Treibhauseffekt abhängen.

Brennstoffzellen

Als zukünftige alternative Antriebstechnologie im Luftverkehr kommen Brennstoffzellen weniger infrage. Derzeit werden zwar Brennstoffzellen zur Bordstromversorgung in Flugzeugen entwickelt, um die Aufgabe der Elektrizitätserzeugung von den Triebwerken zu trennen und diese für den Antrieb effektiver nutzen zu können. Allerdings haben Brennstoffzellen ein relativ hohes Ei-

gengewicht und könnten keine Strahltriebwerke, sondern lediglich weniger effiziente Propellermaschinen antreiben. Zusätzlich entsteht bei der Brennstoffzelle als Reaktionsprodukt überwiegend Wasser, das im Luftverkehr wiederum die oben beschriebenen Probleme mit sich bringt.

Leichtbau und Aerodynamik

Im Vordergrund von Kraftstoffeinsparungen beim Flugzeug standen und stehen der Leichtbau und die Aerodynamik. Die weitere Verbesserung ist beim Leichtbau vor allem von der Entwicklung neuer Werkstoffe abhängig. Zur Optimierung der Aerodynamik werden sogenannte Riblets eingesetzt. Riblets sind Furchen in Strömungsrichtung, die Turbulenzen der um die Flugzeughaut strömenden Luft minimieren und somit den Reibungswiderstand des Flugzeugs verringern. In der Literatur werden Treibstoffeinsparungen durch Riblets in Höhe von 0,5 bis 1,5 Prozent diskutiert. Problematisch und noch Gegenstand der Forschung ist vor allem die Verschmutzung der Riblets durch Ruß und Staubpartikel (Öko-Institut 2004a).

4. Schiffsverkehr

Als beherrschende Antriebstechnologie hat sich im Schiffsbetrieb der (Groß-)Dieselmotor durchgesetzt. Er wird in der Binnenschifffahrt mit Diesel, in der Hochseeschifffahrt mit Schweröl, Gasöl oder marinem Dieseltreibstoff angetrieben. Vor allem wegen des hohen Schwefelgehalts von bis zu 5 Prozent und den dadurch verursachten Schadstoffemissionen besitzt Schweröl ungünstige Umwelteigenschaften. Aufgrund des für den Schiffsverkehr typischen, quasistationären Betriebs kann der Motor kraftstoffsparend ausgelegt und nahe dem Betriebsoptimum gefahren werden. Allerdings besteht auch hier der in Kapitel IV.4 näher beschriebene Zielkonflikt zwischen dem Energieverbrauch und den zu minimierenden Luftschadstoffemissionen.

Als Maßnahmen zur Verbesserung bestehender oder Entwicklung neuer Antriebe kommen prinzipiell alle in Kapitel IV vorgestellten Technologien infrage. Brennstoffzellen werden heute schon im militärischen Bereich für Schiffsantriebe eingesetzt (v. a. die U-Boot-Klasse 212A, die im Oktober 2005 von der deutschen Marine in Dienst gestellt wurde). Eine breite Anwendung im zivilen Schiffsbetrieb ist in den kommenden Jahren aus Kostengründen jedoch fraglich. Vorteilhaft für den Einsatz von Brennstoffzellen in Schiffen wirken sich aus:

- der quasistationäre Betrieb,
- die geringen Platzprobleme beim Einbau und
- der geringe Gewichtseinfluss auf den Kraftstoffverbrauch.

Zugdrachen zur Antriebsunterstützung für Seeschiffe

Eine aus der traditionellen Seefahrt stammende Antriebstechnologie wird heute unter dem Gesichtspunkt des Kraftstoffverbrauchs neu diskutiert: der Segelantrieb. Für Hochseeschiffe sind Segel in Form von Gleitschirmen vorgesehen, die dem Schiff einen regenerativen Vortrieb verschaffen. Die Drachen werden über eine Steuergondel und ein Zugseil direkt am Rumpf des Schiffes befestigt. Ein vollautomatisches Steuerungssystem soll den Drachen optimal zu Windrichtung und Kurs des Schiffes ausrichten und auch Start und Landung vollautomatisch vornehmen.

Dieses Konzept besitzt mehrere Vorteile gegenüber herkömmlichen mastgestützten Segeln: Die Drachen sollen in Höhen von 100 bis 300 m operieren und können somit stetigere und stärkere Winde ausnutzen. Pro Quadratmeter Segelfläche wird damit eine erheblich größere Antriebsleistung erzeugt. Die bei Segelschiffen übliche Schräglage (Krängung) ist dabei minimal (SkySails 2006a). Das System soll sowohl für neue Schiffe (v. a. Frachtschiffe und Superyachten) als auch zur Nachrüstung geeignet sein. Nach Angaben der Firma SkySails, die diese Antriebssysteme entwickelt, sollen bis zu 50 Prozent Kraftstoff eingespart werden können bei einer Amortisation der Investition durch eingesparte Kraftstoffkosten in drei bis fünf Jahren.

Die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Systems wurde im Herbst 2005 in einem Praxistest an einem kleineren Schiff nachgewiesen (Abbildung 4). Im nächsten Jahr sollen die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit im Alltagsbetrieb bei einem Schwergutfrachter gezeigt werden (SkySails 2006b).

Die Umweltvorteile eines solchen Systems wären – die Funktionsfähigkeit vorausgesetzt – sowohl bei den CO_2-Emissionen als auch bei den Schadstoffen evident, denn im Frachtschiffbereich wird vor allem Schweröl eingesetzt, das sehr schwefelhaltig ist (sog. „Bunker C“). Unabhängige Studien zur Verlässlichkeit und tatsächlichen Energieausbeute liegen bislang nicht vor. Eine Studie des Umweltministeriums Dänemarks (EPA DK 2000) hat zwar die Realisierbarkeit von modernen Windschiffen untersucht, deren Potenzial zur Kraftstoffeinsparung jedoch nicht weiter analysiert. Allerdings wird von Fachleuten die Praxistauglichkeit teilweise angezweifelt. Auch die Nachrüstbarkeit von Schiffen, die z. B. von ihrer Rumpfform nicht dafür ausgelegt sind, dass sie gezogen werden, wird infrage gestellt (Handelsblatt 2006).

Reduzierung der Fahrwiderstände

Maßnahmen zur Reduzierung der Fahrwiderstände sind bei Schiffen nur schwer zu realisieren. Die Fahrgeschwindigkeit ist gering, sodass Aerodynamik für den Kraftstoffverbrauch kaum eine Rolle spielt. Der Fahrwiderstand des Wassers wird durch die Rumpfform und den Tiefgang des Schiffes bestimmt. Hier gibt es gewisse Möglichkeiten, durch strömungsoptimierte Rumpfformen (z. B. Doppelrumpf wie beim Katamaran) Verbesserungen zu erzielen.

Mögliche Gewichtsreduktionen durch Leichtbau können nur zum Teil genutzt werden, da sicherheitsrelevante Aspekte berührt werden. Schiffe benötigen für eine stabile Lage im Wasser einen gewissen Tiefgang. Durch

Abbildung 4



SkySails Praxistest mit einem Lotsenschiff in der Ostsee (Herbst 2005)



Quelle: http://www.skysails.info/fileadmin/user_upload/Pressedownload/Fotos/Jan_Luiken_runs_3_web_gross.jpg

Leichtbau könnte jedoch eine erhöhte Zuladung und somit ein auf das Transportaufkommen bezogener Umweltvorteil erreicht werden. Durch besondere Oberflächen, z. B. eine schuppige Oberfläche ähnlich der Haut von Haien (BMBF 2006), und eine regelmäßige Reinigung und Entfernung von Anlagerungen an der Schiffshaut (Algen, Muscheln, Seepocken etc.) kann die Wasserreibung reduziert werden. Derartige Maßnahmen werden heute bereits durchgeführt.

IV. Antriebstechnologien und -systeme

In diesem Kapitel steht die Analyse von technischen Maßnahmen am Fahrzeug im Vordergrund. Sie können zu einer Absenkung des spezifischen Energieverbrauchs führen und damit unabhängig vom verwendeten Kraftstoff zu einer Minderung der ausgestoßenen Treibhausgase beitragen. Das heißt, hier werden die Emissionen Tank-to-Wheels (TTW) betrachtet. Die Darstellung basiert wesentlich auf IFEU (2005a).

Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs setzt sich zusammen aus dem Systemwirkungsgrad aufseiten der Energiewandler und -verbraucher sowie dem Fahrwiderstand (Abbildung 5). Beide Faktoren bieten Ansatzpunkte zu Verbesserungen und damit einer Senkung des Energieverbrauchs.

Im Mittelpunkt der folgenden Analysen stehen technisch bedingte Reduktionen des Kraftstoffverbrauchs und der damit einhergehenden klimarelevanten Emissionen. Darüber hinaus müssen bei technischen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Motoren und Antrieben auch die Luftschadstoffemissionen berücksichtigt werden.

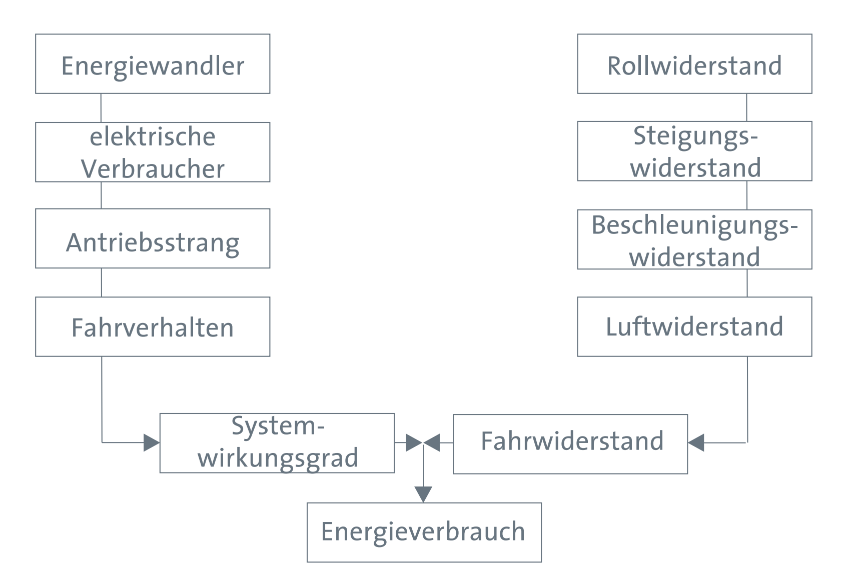
Die Emission von Luftschadstoffen ist in Deutschland bzw. der EU in den letzten Jahren – u. a. veranlasst durch stetig verschärfte Grenzwerte – drastisch gesunken. Es ist davon auszugehen, dass weitere Grenzwertstufen zu einer weiter gehenden Reduktion der Schadstoffemissionen von Neufahrzeugen führen werden. So ist z. B. anzunehmen, dass sich die Grenzwerte für PKW-Dieselfahrzeuge denen der Ottofahrzeuge annähern werden. Die dafür einzusetzenden Schadstoffminderungstechnologien könnten negative Rückwirkungen auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge bzw. auf Technologien, die der Kraftstoffminderung dienen, haben.

Umgekehrt können auch Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung negative Rückwirkungen auf die Emission limitierter Schadstoffe zeigen. So erhöht sich z. B. bei einer aus Effizienzgesichtspunkten wünschenswerten Erhöhung der Verbrennungstemperatur gleichzeitig der Ausstoß von Stickoxiden. Dieser Typ von Effekten wird jeweils bei den relevanten Technologien mitdiskutiert. Eine eigenständige und umfassende Betrachtung von zu entwickelnden Technologien zur Minderung der Luftschadstoffemissionen erfolgt jedoch aufgrund der Schwerpunktsetzung nicht.

Auch der Einfluss verschiedener Kraftstoffe auf die direkten Emissionen der Luftschadstoffe der Fahrzeuge

Abbildung 5

Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch eines Fahrzeugs



Quelle: IFEU 2005a auf Basis von NRC 2002

wird hier nicht weiter problematisiert. Solch eine Nutzung mag im Einzelfall und kurzfristig zum Vor- oder Nachteil gereichen. So werden zum Beispiel durch die Verwendung von RME statt des normalen Dieselkraftstoffs in PKW gelegentlich massenbezogen niedrigere Partikelemissionen, aber höhere Stickoxidemissionen festgestellt. Sind solche Unterschiede drastisch, fließen sie in die politische Behandlung der Schadstoffminderung ein. Ansonsten unterliegen auch derart angetriebene Fahrzeuge der Notwendigkeit der Erfüllung der für sie geltenden Grenzwerte.

1. Ottomotor

Die technischen Möglichkeiten, den spezifischen Kraftstoffverbrauch von konventionellen Ottomotoren zu senken, sind sehr vielfältig. Die im Folgenden betrachteten Technologien besitzen ein kurz- bis mittelfristiges Potenzial zur Umsetzung. Mitunter handelt es sich – wie im Falle der Direkteinspritzung beim VW Lupo – um schon in einzelnen Fahrzeugserien angewandte Methoden. Mit der breiten Anwendung dieser und anderer noch nicht realisierter Einzelmaßnahmen könnte unter günstigen Rahmenbedingungen innerhalb eines Jahrzehnts zu rechnen sein. Die Einführungszeit hängt neben den technischen Herausforderungen vor allem von wirtschaftlichen Kriterien und der Akzeptanz beim Käufer ab.

Neben den konventionellen „Benzinern“ sind heute bereits Motoren im Einsatz, die nach dem Ottoprinzip, aber mit Erdgas oder Wasserstoff betrieben werden. Die Technik für Erdgas- und Wasserstoffmotoren ist somit im Prinzip vorhanden, auch wenn zukünftig noch deutliche Verbesserungen gegenüber heutiger Technik erwartet werden. Die Einführung dieser Motorenkonzepte hängt, neben den oben beschriebenen Kriterien, auch von der Verfügbarkeit des jeweiligen Kraftstoffs ab. Mit der Einführung von Erdgas- und Wasserstofffahrzeugen muss der Aufbau eines entsprechenden Tankstellennetzes einhergehen. Die Klimarelevanz dieser Antriebe hängt in erster Linie von der Gewinnung und Aufbereitung des Kraftstoffs und weniger von den Verbrauchseinsparpotenzialen aufseiten des Antriebes ab.

Zu den Minderungspotenzialen der vorgestellten Einzeltechnologien muss noch angemerkt werden, dass verschiedene Technologien zum Teil auf unterschiedliche Art und Weise das gleiche Minderungspotenzial erschließen. Die angegebenen Werte dürfen also nicht einfach aufsummiert werden.

1.1 Downsizing mit Aufladung

Ottomotoren weisen unter Teillast einen relativ schlechten Wirkungsgrad auf. Eine Verbesserungsmöglichkeit besteht darin, den Motor kleiner und leistungsschwächer auszulegen, damit er häufiger im effizienten Bereich arbeitet („downsizing“). Für die nicht so häufigen Bereiche höherer Leistungsanforderung können verschiedene Aufladesysteme, die die Menge des in den Zylinder eingebrachten Luft-Kraftstoff-Gemisches erhöhen, eingesetzt werden (Abgasturbolader, drehzahlabhängiger Druckwellenlader und Ladeluftkühler). Turbolader finden schon seit Längerem in Dieselmotoren Anwendung, sind aber zukünftig auch bei Ottomotoren sinnvoll (Stan 2005).[1]

[1] Der Übersichtlichkeit wegen wird hier und im Folgenden meist nur jeweils eine Quelle für quantitative Angaben zu CO_2-Minderung und Kosten zitiert. Eine ausführliche Zusammenstellung aller ausgewerteten Quellen findet sich in IFEU (2005a).

Tabelle 2

Turbolader

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*6*	*8*	*6*	*6*	n.a.
Kosten (US-Dollar)[1]	560	(210)	490[2]	(210)	n.a.

[1] Genauer: Kostenanteil am Endkundenpreis des Fahrzeugs. Die Kostenabschätzung bestimmter technischer Maßnahmen ist methodisch außerordentlich schwierig. Daher sind solche Kostenangaben immer mit erheblichen Unsicherheiten behaftet und dienen hier v. a. illustrativen Zwecken.
[2] In der Endfassung von CARB (2004) vom 6. August 2004 steht hier „– 18“. Da dies nicht nachvollziehbar ist, ist hier der Wert aus der Entwurfsfassung vom 14. Juni 2004 zitiert.
Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2009–2012, Basisjahr 2002

1.2 Direkteinspritzung

Die Kraftstoffdirekteinspritzung ist bei Dieselmotoren heute Standard. Auch bei Ottomotoren wird diese Form der Einspritzung zunehmend eingesetzt, um den Wirkungsgrad des Motors zu erhöhen (Stan 2005). Zusätzlich können erst durch die Direkteinspritzung und deren differenzierte Steuerung verschiedene, dem Lastzustand des Motors angepasste, Betriebsarten realisiert werden.

Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Modelle mit Benzindirekteinspritzung können das Potenzial zur Emissionsminderung nur bedingt umsetzen (DLR 2003; OECD/ IEA 2005). Es besteht hier ein Zielkonflikt zwischen CO_2-Minderung und NO_x-Emissionen. Vor allem bei Teillast sind hohe Wirkungsgrade durch „magere“ Luft-Kraftstoff-Gemische mit Luftüberschuss zu erzielen. Gleichzeitig steigt aber der NO_x-Anteil im Abgas, der, technologisch bedingt, nicht mit herkömmlichen 3-Wege-Katalysatoren gesenkt werden kann. Hierfür muss man z. B. sog. NO_x-Speicherkatalysatoren einsetzen, die sich derzeit noch in der Entwicklung befinden. Zur Regeneration der NO_x-Speicher muss das Gemisch in regelmäßigen Abständen „angefettet“ werden, was den Kraftstoffverbrauch erhöht und die CO_2-Emissionen ansteigen lässt.

Die Lösung dieses Problems und weitere Verbesserungen der Einspritzsysteme und des Brennverfahrens lassen die Benzindirekteinspritzung mittelfristig als eine vielversprechende Möglichkeit zur Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs erscheinen (DLR 2003).[2]

[2] Die Entwicklung von Piezo-Injektoren zur Kraftstoffdirekteinspritzung wurde 2005 mit dem Deutschen Zukunftspreis ausgezeichnet; http://www.deutscher-zukunftspreis.de/newsite/2005/hintergrund_ 01.shtml.

Tabelle 3

Direkteinspritzung (mageres Gemisch)

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*6*	*9*	*4*	*5*	*8*
Kosten (US-Dollar)	728	959	1.043	1.057	1.554

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2015, Basisjahr 2002

1.3 Variable Ventilsteuerung

Tabelle 4

Variabler Ventilhub

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*4–5*	*4–6*	*3–4*	*4–5*	*4–5*
Kosten (US-Dollar)	154–308	259–581	210–773	259–581	259–911

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2009 bis 2012, Basisjahr 2002

Tabelle 5

Elektromagnetische/elektrohydraulische Ventilsteuerung

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*11*	*11–16*	*11*	*11–13*	*11–12*
Kosten (US-Dollar)	564–676	637–764	882–1.078	637–764	1.078–1.274

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2013 bis 2015, Basisjahr 2002

Eine weitere, aussichtsreiche Maßnahme zur Verbrauchsreduzierung bei Ottomotoren stellt die variable Ventilsteuerung dar. Darunter versteht man die Möglichkeit, den Ventilhub und/oder den Öffnungszeitpunkt bzw. die Öffnungsdauer des Zylindereinlassventils dem Lastzustand des Motors anzupassen. Damit kann die Verbrennung gesteuert und auf bestimmte Lastbereiche hin optimiert werden.

1.4 Variable Zylinderabschaltung

Eine andere Möglichkeit, den Wirkungsgrad unter Teillast zu erhöhen, stellt die variable Zylinderabschaltung dar. Dabei können in Betriebszuständen mit geringer Last einzelne Zylinder abgeschaltet werden, wodurch die übrigen bei höherer Last und besserem Wirkungsgrad betrieben werden können.

Tabelle 6

Variable Zylinderabschaltung

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*3*	*6*	*5*	*6*	*4*
Kosten (US-Dollar)	n.a.	113–333	113–467	113–333	147–541

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2009 bis 2012, Basisjahr 2002

1.5 Verdichtung

Tabelle 7

Variable Verdichtung

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*7*	*7*	*7*	*7*	*7*
Kosten (US-Dollar)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2009 bis 2012, Basisjahr 2002

Das Verdichtungsverhältnis ist ein wichtiger Parameter für die Effizienz von Verbrennungsmotoren. Dabei gilt in der Regel: je höher das Verdichtungsverhältnis, desto besser der Wirkungsgrad (Stan 2005). Das Verdichtungsverhältnis ist bei klassischen Verbrennungsmotoren durch die Geometrie des Motors fest vorgegeben. Über gewisse Konstruktionsmerkmale (z. B. variable Führung des Kolbenbodens) kann das Verdichtungsverhältnis allerdings dem Lastzustand des Motors angepasst werden.

1.6 Erdgas

Neben Benzin kann auch Erdgas nach dem Prinzip des Ottomotors in Verbrennungskraftmaschinen umgesetzt werden. Aufgrund des geringeren spezifischen Kohlenstoffgehalts weist Erdgas einen um etwa 20 Prozent günstigeren Emissionsfaktor als Diesel oder Benzin auf. Prinzipiell kann das Erdgas verflüssigt (Liquified Natural Gas, LNG) oder komprimiert (Compressed Natural Gas, CNG) im Fahrzeug gespeichert und eingesetzt werden. Nach Plänen der Gaswirtschaft soll in Deutschland eine flächendeckende Tankstelleninfrastruktur für CNG aufgebaut werden (s. a. Kap. X.1). Die Speicherung des komprimierten Erdgases erfolgt unter Drücken von 200 bar in Stahlbehältern mit Hochdruckventilen (Kolke 2004). Hierin liegt einer der Nachteile von Ergasfahrzeugen begründet: das relativ hohe Eigengewicht der mitzuführenden Speicher.

CNG-Fahrzeuge unterscheiden sich von herkömmlichen Benzinfahrzeugen nur in einigen Bauteilen, die vor allem die Speicherung und die Gemischaufbereitung (Tank, Gasleitungen etc.) des Kraftstoffs betreffen. Da Erdgas eine bessere Klopffestigkeit als Benzin aufweist,[3] lassen sich angepasste Motoren bei höherer Verdichtung und damit mit höherer Effizienz betreiben. Hier liegen Entwicklungspotenziale zur weiteren Motorverbesserung. Bivalent ausgelegte Fahrzeuge, die sowohl mit Benzin als auch mit Erdgas betrieben werden können, können diesen Vorteil allerdings nicht ausnutzen und weisen teilweise schlechtere Wirkungsgrade als Benzin- oder Dieselmotoren auf (UBA 2003b).

[3] Oktanzahl von 134 im Vergleich zu 95 bis 98 bei bleifreiem Superbenzin.

Tabelle 8

Erdgas

	CNG 2002	CNG 2010	zum Vergleich: Benzin 2010
CO_2-Minderung (%)	*20*	*34*	*16*
Energieverbrauch (%)	*3*	*- 14*	*- 15*
Mehrkosten (Euro)	1.953	2.633	680

Referenzfahrzeug: Otto-PKW (Benzin) 2002 mit Endkundenpreis 18 600 Euro. Die CNG-Fahrzeuge sind monovalent ausgelegt. Der größte Beitrag zur Verbrauchsminderung stammt aus dem „downsizing“.
Quelle: CONCAWE 2003

1.7 Ethanol

Auch Ethanol eignet sich zum Einsatz als Kraftstoff in Ottomotoren.[4] Gegenüber dem Benzinbetrieb sind allerdings einige spezielle Motoranpassungen erforderlich. Beispielsweise sollten Ventile und Ventilsitze speziell gehärtet sein und alle kraftstoffführenden Teile aus besonders korrosionsbeständigen Materialien bestehen. Ethanol ist gut mit Ottokraftstoff mischbar und kleinere Mengen werden von allen Motoren problemlos toleriert. Die gültige Kraftstoffnorm DIN EN 228 erlaubt Zumischungen von bis zu 5 Prozent.

Einige Hersteller bieten inzwischen Fahrzeuge an, die mit Ottokraftstoff und Ethanol in jedem beliebigen Mischungsverhältnis arbeiten können, sog. Flexible Fuel Vehicles, FFV. Der Hauptunterschied zwischen FFVs und konventionellen Fahrzeugen ist ein spezielles mikroprozessorgesteuertes Motormanagement, das das jeweilige Kraftstoffmischungsverhältnis erkennt und einige Motorparameter (Zündzeitpunkt, Kraftstoff-Luft-Verhältnis) entsprechend anpasst.

Die Mehrkosten gegenüber dem konventionellen Modell betragen je nach Hersteller zwischen ca. 300 Euro (Ford Focus FFV) und 800 Euro (Saab 9–5 Bio-Power) (ADAC 2006).

1.8 Wasserstoff

Als alternativer Kraftstoff für Ottomotoren kommt auch Wasserstoff infrage. Dieser kann in tiefkalter flüssiger Form oder gasförmig unter hohem Druck (bis zu 750 bar) in Fahrzeugen mitgeführt werden. Wasserstoff verursacht bei der Verbrennung kein CO_2 und deutlich geringere Schadstoffemissionen als konventionelle Verbrennungsmotoren. Vorteile von Wasserstoffmotoren gegenüber Benzinern sind vor allem die Möglichkeit, bei großem Luftüberschuss zu arbeiten, und die weiten Zündgrenzen des Wasserstoffs. Nachteile sind – in noch größerem Maße als beim Erdgas – die aufwendigen und schweren Speicher und eine heftigere Verbrennung, die eine höhere Materialbeanspruchung mit sich bringt.

[4] Methanol wäre zwar prinzipiell ebenfalls geeignet, besitzt aber gegenüber Ethanol einige schwerwiegende Nachteile, z. B. seine hohe Toxizität, und wird daher gegenwärtig kaum noch diskutiert. Einen gewissen Charme besitzt Methanol möglicherweise für den direkten Einsatz in Brennstoffzellen (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC).

Tabelle 9

Wasserstoff

	gasförmig 2010	**flüssig 2010**
CO_2-Minderung (%)	*100*	*100*
Energieverbrauch (%)	*- 25*	*- 25*
Mehrkosten (Euro)	5.430	5.430

Referenzfahrzeug: Otto-PKW (Benzin) 2002 mit Endkundenpreis 18 600 Euro.
Quelle: CONCAWE 2003

2. Dieselmotor

Gegenüber vergleichbaren Benzinmodellen haben Dieselmotoren prozessbedingt einen generellen Verbrauchsvorteil, der bei Kleinwagen um 20 Prozent und bei Mittelklassewagen bis zu 30 Prozent betragen kann (DLR 2003). Zusätzlich zu diesem Verbrauchsvorteil hat der geringere Tankstellenpreis für Diesel dazu geführt, dass sich Dieselmotoren auch im PKW-Bereich etabliert haben. Im Nutzfahrzeug-Sektor ist der Dieselmotor nicht zuletzt wegen seiner Leistungscharakteristik, Haltbarkeit und Wirtschaftlichkeit der beherrschende Antrieb.

Der Dieselmotor wurde bereits in der Vergangenheit auf einen günstigen Verbrauch hin optimiert und hat in dieser Hinsicht einen relativ hohen Entwicklungsstand erreicht. Deutliche Effizienzsteigerungen konnten vor allem durch die elektronische Direkteinspritzung erzielt werden, deren Entwicklung weitestgehend abgeschlossen ist (SRU 2005). Wie die Literaturanalyse zeigte, sind bei Dieselmotoren in naher Zukunft nur geringe Kraftstoffeinsparungen durch weitere Optimierungen schon angewandter Technologien (z. B. Minimierung der Motorreibung, verbesserte Abgasrückführung) zu erwarten.

Mehr noch als bei Ottomotoren existiert bei der Auslegung von Dieselmotoren ein Zielkonflikt zwischen der Steigerung der Energieeffizienz und den zunehmenden gesetzlichen Anforderungen zur Emissionsreduktion der Luftschadstoffe Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickoxide und Partikel. Der Hauptgrund dafür ist, dass Dieselmotoren aus prozesstechnischen Gründen nicht mit 3-Wege-Katalysatoren betrieben werden können. Zur Abgasnachbehandlung haben sich bei Dieselmotoren Oxidationskatalysatoren zur Reduzierung der Kohlenwasserstoff- bzw. Kohlenmonoxidemissionen durchgesetzt. Zur Partikelreduktion werden bereits jetzt in einer Reihe von Modellen und in naher Zukunft in alle Fahrzeuge serienmäßig Filter eingebaut. Der damit einhergehende Mehrverbrauch beträgt typischerweise etwa 4 Prozent (CONCAWE 2003).

Die NO_x-Emissionen werden heute noch durch innermotorische Maßnahmen, die meist einer weiteren Effizienzsteigerung entgegenstehen, gesenkt. In dem Maße, in dem aufgrund einer zusätzlichen Nachbehandlung auf die innermotorische Absenkung der NO_x-Emissionen verzichtet werden kann, entstehen neue Freiheitsgrade bei der Effizienzauslegung des Motors. Die Nachbehandlung von Stickoxidemissionen kann prinzipiell über NO_x-Speicherkatalysatoren oder SCR(Selective Catalytic Reduction)-Filter realisiert werden. Der Speicherkatalysator nimmt das NO_x zunächst auf und muss dann in regelmäßigen Abständen durch eine „Anfettung“ des Gemisches wieder regeneriert werden. Im SCR-Filter wird das NO_x durch ein zusätzlich mitgeführtes Additiv (eine Harnstofflösung, Handelsname „AdBlue®“) zu Stickstoff reduziert. Die SCR-Technik eignet sich besonders für schwere Nutzfahrzeuge.

Je nach Effizienz dieser Systeme können dann effizienzsteigernde, innermotorische Maßnahmen realisiert werden. Mit SCR-Filtern lässt sich ein Minderverbrauch von 3 bis 5 Prozent (SRU 2005) realisieren, wohingegen NO_X-Speicherkatalysatoren zu einem Mehrverbrauch von etwa 2 Prozent führen.

Tabelle 10

Diesel

	2002	2010 ohne DPF	2010 mit DPF
CO_2-Minderung (%)	*18*	*24*	*21*
Energieverbrauch (%)	*- 18*	*- 23*	*- 20*
Mehrkosten (Euro)	1.700	1.900	2.600

Referenzfahrzeug: Otto-PKW (Benzin) 2002 mit Endkundenpreis 18 600 Euro.
DPF: Dieselpartikelfilter
Quelle: CONCAWE 2003

3. Konvergenz von Otto- und Dieselmotoren

Tabelle 11

HCCI

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*4*	*6*	*3*	*4*	*5*
Kosten (US-Dollar)	560	840	840	n.a.	n.a.

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2013 bis 2015, Basisjahr 2002

Konventionelle Verbrennungsmotoren, gleich ob Otto oder Diesel, haben ein Grundproblem: Durch den Brennraum läuft eine Flammenfront, die den Brennraum in relativ heiße und kalte Bereiche aufteilt mit negativen Auswirkungen auf die NO_x- und Rußemissionen. Ziel ist deshalb, ein homogenes Luft-Kraftstoff-Gemisch an mehreren Stellen im Zylinder selbständig und gleichzeitig ohne Flammenfront und Druckwelle im Zylinder zu entzünden und zu verbrennen. Damit wird der Vorteil des homogenen Luft-Kraftstoff-Gemisches bei Ottomotoren mit dem Selbstzündungsverhalten von Dieselmotoren verbunden. Dieses Verfahren wird homogenisierte Verbrennung (Homogeneous Compression Combustion Ignition, HCCI) genannt.

Ein Problem von HCCI-Verfahren ist, dass bei Ottomotoren das Verdichtungsverhältnis in großen Bereichen des Motorenkennfeldes für eine Selbstzündung zu niedrig ist. Dieselkraftstoff ist hingegen wegen seines Siedeverhaltens schlecht homogenisierbar und zudem zu zündwillig, sodass je nach Last die Selbstzündung zu früh einsetzt. Daraus folgt, dass reine HCCI-Konzepte nur in Teilen des Motorenkennfeldes funktionieren. Umgangen werden kann dies, indem außerhalb des für HCCI geeigneten Bereichs der Motor z. B. wie ein normaler Ottomotor mit Zündkerze betrieben wird (Die Zeit 2000).

Zur umfassenden Realisierung der Vorteile der HCCI-Verfahren sind Kraftstoffe mit entsprechenden verfahrensangepassten Verdampfungs- und Zündeigenschaften erforderlich. Diese Anpassung an motorische Anforderungen lässt sich vor allem bei synthetischen Kraftstoffen (GtL bzw. BtL: Gas- bzw. Biomass-to-Liquid) durchführen. Die Anwendung von synthetischen Kraftstoffen in Zusammenhang mit HCCI-Verfahren ist daher sehr wahrscheinlich (Die Zeit 2004).

Das Entwicklungsstadium dieser Technologie befindet sich gegenwärtig auf dem Niveau von Prüfstandversuchen. Obwohl die Automobilindustrie das HCCI-Konzept für vielversprechend hält, werden bis zu einer breiten Markteinführung noch zehn Jahre vergehen (Shell 2004).

4. Exkurs: Wechselwirkungen zwischen CO_2-Minderungsmaßnahmen und Schadstoffemissionen

Fahrzeugtechnische Maßnahmen, die der Reduktion von CO_2-Emissionen dienen (praktisch: Kraftstoffverbrauchsreduktionen), können hinsichtlich der Emissionen von human- und ökotoxischen Schadstoffen durchaus kontraproduktiv sein. Wie einleitend dargestellt sind diese Zusammenhänge nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Im Folgenden soll daher lediglich ein kurzer zusammenfassender Überblick über einige Implikationen gegeben werden.

Schadstoffminderungsmaßnahme G-Kat

Mit der Einführung des geregelten 3-Wege-Katalysators (g-Kat) wurde die enge Eingrenzung des stöchiometriebezogenen Luft-Kraftstoff-Verhältnisses (λ) um den Wert 1 notwendig. Der im Teillastbereich verbrauchseffiziente Magerbetrieb war damit nicht mehr möglich, was zunächst zu spürbaren Verbrauchserhöhungen führte. In den letzten Jahrzehnten wurden diese dann jedoch durch motorische Weiterentwicklungen überkompensiert.

CO_2-Minderungsmaßnahmen Direkteinspritzung und Magerbetrieb

Mit zunehmender Bedeutung von Verbrauchs- und CO_2-Emissionsreduktionen wurde die Entwicklung von Motoren für den (teilweisen) Magerbetrieb wieder interessant, da vor allem im Magerbetrieb die Vorteile der Direkteinspritzung (Schichtladung) realisiert werden. Die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten für NO_x kann durch Speicherkatalysatoren erreicht werden. Diese haben aber bei der Regeneration einen erhöhten Kraftstoffverbrauch, wodurch der Verbrauchsvorteil wiederum eingeschränkt wird. Darüber hinaus reagieren sie extrem empfindlich auf kleinste Mengen von Schwefel im Kraftstoff. Die periodische Entschwefelung des Katalysators erfordert ebenfalls zusätzlichen Kraftstoff.

CO_2-Minderungsmaßnahme „Diesel- statt Otto-KFZ“

Der spezifische Verbrauch von Dieselfahrzeugen ist unter sonst gleichen Bedingungen niedriger als der von Ottofahrzeugen. Insbesondere die NO_x- und Partikelemissionen sind jedoch deutlich höher. Eine Ausweitung des Dieselanteils an der gesamten Fahrleistung würde damit zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen aber gleichzeitig zu einem Anstieg der NO_x- und Partikelemissionen führen.

Schadstoffminderungsmaßnahme Dieselpartikelfilter

Zur Minderung der Partikelemissionen von Dieselfahrzeugen sind Filter erforderlich bzw. werden es bei zukünftig weiter verschärften Grenzwerten sein. Zusätzliche Aggregate in der Abgasanlage erhöhen aber den Abgasgegendruck und damit den Verbrauch.

Schadstoffminderungsmaßnahme Diesel-NO_x-Katalysator

Zurzeit werden die NO_x-Emissionen durch innermotorische Maßnahmen gemindert, die mit Effizienzbeschränkungen verbunden sind. Zur weiteren Verringerung der NO_x-Emissionen können unterschiedliche Katalysatorkonzepte zum Einsatz kommen, die einerseits als zusätzliches Aggregat den Abgasgegendruck erhöhen und Kraftstoff zur Regeneration verbrauchen, andererseits aber Verbrauchsoptimierungen am Motor zulassen. Den Gesamteffekt belastbar abzuschätzen ist nicht einfach. Für Speicherkatalysatoren wird ein Mehrverbrauch (Bay. LfU 2003), für SCR-Filter eine Verbrauchsminderung angegeben (SRU 2005).

Fazit

Die Nichtanwendbarkeit existierender Schadstoffreduktionsverfahren kann temporär den Einsatz – oder auch die Entwicklung – von verbrauchsmindernden Techniken aufhalten. Auch ausgereifte Maßnahmen zur Schadstoffreduktion wirken verbrauchssteigernd. Jedoch kann für relevante motorische Verbrauchsreduktionen davon ausgegangen werden, dass Aufwendungen für zusätzliche Schadstoffreduktionsmaßnahmen nicht zu einem ungünstigen CO_2-Saldo führen. Allerdings ist eine Quantifizierung schwierig, da bereits die Wahl der Referenz (Baseline) eine komplexe Aufgabe darstellt: Berücksichtigt werden müssten alle relevanten Kombinationen von motorischen und Abgasbehandlungstechnologien. Bei der Quantifizierung der Wechselwirkungen von CO_2- und Schadstoffminderungsmaßnahmen besteht damit noch Forschungsbedarf.

5. Hybridantrieb

Hybridfahrzeuge kombinieren mehrere Energiewandler und Speichersysteme im Antriebsstrang. Typischerweise handelt es sich dabei um Verbrennungs- und Elektromotoren mit Tank und Batterie. Bei den sog. Parallelhybriden können Verbrennungs- und Elektromotor die Räder jeweils alleine oder gemeinsam antreiben. Bei den seriellen Hybriden erfolgt der Radantrieb ausschließlich elektrisch. Die Verbrennungskraftmaschine (VKM) dient nur dazu, über einen elektrischen Generator die Batterie aufzuladen. Mischhybride besitzen eine variable Leistungsverzweigung, über die die VKM gleichzeitig die Räder direkt und via Generator und Elektromotor indirekt antreibt. Hybridfahrzeuge werden häufig nach dem Grad der Hybridisierung charakterisiert. Als Indikator dient der Anteil der Nennleistung des Elektromotors an der Gesamtleistung: Übliche Kategorien sind „mild“ (< 23 Prozent), „semi“ (24 bis 38 Prozent) und „voll“ (> 38 Prozent) (Stan 2005). Als Kraftstoffe für Hybride kommen alle für reine VKM-Antriebe diskutierten Arten infrage.

Die Verbrauchsminderung gegenüber konventionellen Fahrzeugen auf gleichem Entwicklungsstand resultiert im Wesentlichen aus folgenden Eigenschaften des Antriebsstrangs bzw. der Betriebsweise:

– Rekuperation, d. h. teilweise Rückgewinnung der (insbesondere im Stadtverkehr häufig anfallenden) Bremsenergie über Einspeisung von Elektrizität in die Batterie. Dieser Beitrag wird auch in milden und Mikrohybriden realisiert.

– Optimaler Betriebsbereich der Verbrennungsmotoren, d. h. Vermeidung der (insbesondere bei Ottomotoren) niedrigen Wirkungsgrade im Teillastbereich und vorwiegende Nutzung der höheren Wirkungsgrade im mittleren bis oberen Lastbereich (bei seriellen praktisch permanente Volllast): Je nach Konzept und Detailauslegung sorgt das Antriebsmanagement dafür, dass in unteren Lastbereichen ausschließlich der Elektromotor das Fahrzeug antreibt.

– „Downsizing“, d. h. kleinere Auslegung des Verbrennungsmotors (mit dem Effekt der häufigeren Nutzung höherer motorischer Lastbereiche) als in konventionellen Fahrzeugen gleicher Leistung, da in Parallelhybriden bei Hoch- bis Volllast der Elektromotor zugeschaltet wird (Batteriebetrieb) bzw. der Elektromotor bei seriellen Hybriden zusätzlich Strom aus der Batterie bezieht.

Ein wichtiger Vorteil aller Hybride besteht in der Möglichkeit vollständig emissionsfreier Fahrt (limitiert durch die Batteriekapazität), etwa in stark belasteten Gebieten wie z. B. im innerstädtischen Bereich.

Die Schwachstellen des Hybridkonzepts können wie folgt charakterisiert werden:

– Komplexität: Durch die größere Anzahl an Komponenten ergeben sich höhere Kosten (Produktion und Wartung) und Verluste durch zusätzliche Energieumwandlungen, die die Verbrauchsminderungen reduzieren.

– Gewicht: Das zusätzliche Gewicht der hybridspezifischen Komponenten limitiert die Verbrauchsreduktion gegenüber monovalenten Fahrzeugen.

– Starke Abhängigkeit der Effizienz vom Fahrprofil: Zwar resultieren im Stadtverkehr wegen hoher Rekuperation und Umgehung des ungünstigen Teillastbetriebs vergleichsweise hohe Einsparungen, insbesondere bei Otto-PKW. Außerorts sind die Effekte jedoch deutlich kleiner; ggf. können bei hohen Geschwindigkeiten sogar Mehrverbräuche durch das Zusatzgewicht auftreten.

Die Potenziale der Hybridtechnologie zur Verbrauchsreduktion sind bereits in einer ganzen Reihe von Studien untersucht worden (AEA 2001; Argonne 2002; CARB 2004; CONCAWE 2003; GM 2005; Kolke 2004; Ricardo 2003; Stan 2005) – mit teilweise sehr unterschiedlichen bzw. schwer vergleichbaren Ergebnissen. Hauptgrund ist

die relativ undifferenzierte Behandlung von Hybriden in den meisten Studien: Der gesamte Hybridantrieb wird als eine Maßnahme zur Minderung von Verbrauch und CO_2-Emissionen behandelt (oder zumindest so dargestellt). Klar ist jedenfalls, dass das Hybridkonzept bereits heute zur Emissionsminderung beitragen kann und noch erhebliches Entwicklungspotenzial besitzt.

5.1 Komponenten

Verbrennungsmotor

Grundsätzlich können alle für VKM diskutierten Technologien und Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion auch für VKM in Hybridantrieben angewendet werden. Allerdings handelt es sich dabei zu einem großen Teil um Maßnahmen, die den Motorwirkungsgrad in unteren und mittleren Lastbereichen verbessern sollen. Hybridkonzepte versuchen dagegen, gerade diese Bereiche zu vermeiden bzw. deren Anteil am Betrieb zu reduzieren. Für VKM in Hybriden geeignet sind damit vor allem Maßnahmen, die auch bei höherer Last wirksam sind (Kap. IV.1 u. IV.2). Durch die Konzentration des Betriebs auf Hoch- und Volllast kann auch die Reduktion von Schadstoffemissionen verbrauchsgünstiger realisiert werden.

Auch grundlegend neue Konzepte werden für Hybride konkret diskutiert: In Stan (2005) wird über den Einsatz von 2-Takt-Motoren in seriellen Hybriden berichtet. Zweitakter sind kleiner und leichter als Viertakter, wiesen allerdings bisher meist einen höheren Verbrauch auf. Durch innere Gemischbildung mittels Direkteinspritzung sollen die Nachteile behebbar sein. Ferner werden für serielle Hybride dieselbetriebene Gasturbinen als Alternative zu VKM diskutiert.

Elektromotor/Generator

Elektromotoren und Generatoren sind hinsichtlich ihrer Wirkungsgrade weitgehend ausgereift. Große Unterschiede und wahrscheinlich auch Potenziale zur weiteren Optimierung weisen Elektromotoren beim Leistungsgewicht auf. In Spiegel (2005) wird von einer Vervierfachung der massenbezogenen Leistung von Toyotamotoren innerhalb der letzten Jahre berichtet (allerdings sind die Bezüge nicht ganz klar). Unter sonst gleichen Bedingungen führen die Gewichtsreduktionen zu Verbrauchs- und CO_2-Reduktionen (s. a. Kap. IV.10 „Leichtbau“).

Noch am Anfang der Entwicklung steht ein als Freikolbenlineargenerator bezeichnetes Konzept für serielle Hybride: Der Kolben eines Zylinders wirkt unmittelbar ohne Pleuelstange und Kurbelwelle auf einen Lineargenerator. Damit wird eine sehr kompakte, leichte und einfache Konstruktion mit einer gegenüber konventionellen Konstruktionen geringen Anzahl an Reibungspunkten möglich (DLR 2004).

Batterien und sonstige Speicher für elektrische Energie

Für Praxistauglichkeit und energetische Effizienz von elektrischen Antrieben sind die Batterien der limitierende Faktor (Batteriegewicht, Reichweite). Gegenwärtig existiert kein vollkommen befriedigendes System. Verglichen mit reinen Elektrofahrzeugen sind die Probleme für Hybride wegen der geringeren zu speichernden Energiemengen etwas weniger ausgeprägt. Im Wesentlichen werden heute NiMH- und Li/Ionen-Batterien eingesetzt. Für „sehr milde“ bzw. sogenannte „Mikrohybride“ (Ford 2005) kommen auch Bleibatterien weiter in Betracht. Als vielversprechendes neues Konzept werden Li/Polymer-Batterien betrachtet. Angaben zu Effizienz- und CO_2-Vorteilen neuer oder weiterentwickelter Systeme liegen nicht vor.

Als Ersatz oder Ergänzung von Batterien als Speicher werden auch Superkondensatoren diskutiert. Superkondensatoren können nur geringe Energiemengen speichern, aber kurzzeitig hohe Leistungen liefern. Entsprechend gering dürften Verbrauchsreduktionen ausfallen, wenn sie statt Batterien eingesetzt werden, da die VKM dann häufiger im Teillastbereich betrieben wird. Der Haupteffekt besteht damit in der Erhöhung der Fahrdynamik durch schnelle Leistungsentwicklung und nicht in Verbrauchsminderungen. Als Ergänzung zu Batterien machen sie das Gesamtsystem prinzipiell komplizierter, schwerer und teurer. Superkondensatoren sind vor allem mit kleiner Kapazität für Starter-/Generatorsysteme sinnvoll. Schnelle Verfügbarkeit der notwendigen Leistung zum Anlassen des Motors ist hier eine Voraussetzung für eine von den Kunden akzeptierte schnelle Start-Stopp-Automatik.

Systemauslegung und Antriebsmanagement

Entscheidend für die Effizienz von Hybridsystemen ist das Gesamtdesign, d. h. vor allem die Wahl parallel oder seriell und (bei parallel) der Grad der Hybridisierung. Wahrscheinlich gibt es keinen für alle Größenklassen und Anwendungsbereiche gleich geeigneten Hybridtyp. Die sorgfältige Abstimmung der Technik auf das Nutzungsprofil dürfte damit auf Systemebene erhebliche Potenziale erschließen. Das Gleiche gilt für das Antriebsmanagement im Betrieb.

5.2 Plug-in-Hybrid

Als eine spezielle Systemauslegung kann der sog. „Plug-in-Hybrid“ betrachtet werden. So werden Hybride bezeichnet, deren Batterie auch aus einer externen Stromquelle aufgeladen werden kann. Sie existieren zurzeit nur als Konzeptfahrzeuge (z. B. DaimlerChrysler „Plug-in-Hybrid-Sprinter“ [DaimlerChrysler 2004]) oder Umbauten des Toyota Prius (Ladeelektrik und größere Batterien), sollten technisch allerdings unproblematisch sein. Ziel ist es, die Reichweite bei rein elektrischem Antrieb zu vergrößern – bei den meisten Konzepten auf etwa 30 km – vor allem um in bestimmten Gebieten (z. B. Innenstädte mit hoher Schadstoffbelastung, Kur- und Erholungsorte) abgasfrei fahren zu können. Verbrauchsreduktionen spielen dabei keine entscheidende Rolle. Tendenziell ist bei Berücksichtigung der Strombereitstellung und des Mehrgewichts sogar eher mit einer Verbrauchserhöhung zu rechnen.

Da beim Plug-in-Hybrid in gewissem Umfang Benzin bzw. Diesel durch Elektrizität substituiert wird, kann damit ein Beitrag zur Verringerung der Abhängigkeit von Ölimporten geleistet werden. Um wieviel die CO_2-Emissionen dadurch reduziert werden können, hängt maßgeblich davon ab, aus welcher Primärenergie der Strom hergestellt wird. Einen (indirekten) Effekt in Richtung CO_2-Reduktion könnten Plug-in-Hybride dadurch auslösen, dass sie als Speicher in das Stromnetz einbezogen werden können und damit der Einsatz von Kraftwerken effizienter gestaltet werden kann. Dieser Beitrag ist allerdings absehbar sehr gering.

Die größte technologische Herausforderung bei der Weiterentwicklung des Plug-in-Hybridkonzepts sind hocheffiziente und leichte Batterien mit hoher Lebensdauer (z. B. 100 000 Fahrzeugkilometer). Die Batterien werden im Plug-in-Betriebsmodus extrem stark beansprucht. Dies ist auch kostenseitig von höchster Bedeutung: Wäre während der Lebensdauer des Fahrzeugs ein Austausch der Batterien erforderlich, wäre das Konzept wirtschaftlich nicht darstellbar (EPRI 2001).

5.3 Hydraulischer Hybrid

Auch über ein hydraulisches System kann Bremsenergie gespeichert und beim nächsten Beschleunigungsvorgang wieder abgerufen werden. Hierzu benötigt man ein Aggregat, das sowohl als Kompressionspumpe als auch als Motor betrieben werden kann, sowie einen Akkumulator (d. h. ein Druckgefäß). Hierbei handelt es sich um Standardkomponenten die kommerziell verfügbar sind. Die Schwierigkeit ist die Integration in ein effizient funktionierendes Gesamtsystem. Die Technologie eignet sich vor allem für Fahrzeuge, die häufig im Stop-and-go-Modus betrieben werden, z. B. Lieferfahrzeuge und Linienbusse.

Langfristiges Ziel ist es, das herkömmliche Getriebe komplett durch eine hydraulische Kraftübertragung zu ersetzen. Als Entwicklungsziele werden ein um 30 bis 40 Prozent verringerter Kraftstoffverbrauch und eine Amortisation der Anschaffung in weniger als drei Jahren angegeben (EPA 2004). Gegenwärtig wird ein Demonstrationsfahrzeug zusammen mit einem Paketdienst für einen Praxistest entwickelt (EPA 2005).

5.4 Entwicklungsstand und Perspektiven

Hybridfahrzeuge haben nach wie vor anteilsmäßig bezogen auf den Gesamtbestand nur geringe Bedeutung, dringen aber seit einigen Jahren zunehmend erfolgreich in den PKW-Markt ein. Projektionen des KFZ-Marktes in der EU-25 halten einen Anteil an den Neuzulassungen von 7 Prozent im Jahr 2010 und von über 15 Prozent in 2020 für möglich (bei einem Ölpreis von 60 US-Dollar/bbl). Bezogen auf die CO_2-Emissionen entspräche dieser Marktprojektion eine Minderung um 18 Mio. t bei einem Ausgangswert 486,9 Mio. t im Jahr 2020 (ohne Hybrid) (IPTS 2005, S. 16 f.).

Es ist zu beobachten, dass die Mehrzahl der neuen Hybridmodelle, besonders in den USA, dem SUV- und Luxussegment zuzuordnen ist. Hier wird die Hybridtechnik einerseits dazu genutzt, das Umweltimage dieser Fahrzeuge zu verbessern, andererseits werden auch die leistungssteigernden Merkmale (z. B. höhere Beschleunigungswerte) aktiv beworben.

Das zurzeit am weitesten verbreitete Hybridfahrzeug ist der Toyota Prius, ein Mischhybrid mit Ottomotor und NiMH-Batterie, der bereits in der dritten Modellgeneration produziert wird. Tabelle 12 fasst Firmendaten von Toyota zu Verbrauch bzw. Verbrauchsminderungen, Wirkungsgraden etc. zusammen. Die Daten für den Prius markieren den Bereich schnell umsetzbarer Minderungsmöglichkeiten.

Hybridfahrzeuge sind in vielen Konzeptvarianten (Ausnahme z. B. Freikolbenlineargenerator) fast oder vollständig marktreif. Dokumentiert wird dies insbesondere durch den Toyota Prius, bei dem die komplexeste Form, der Mischhybrid, realisiert ist. Ebenfalls bereits in großen Stückzahlen verkauft sind milde Parallelhybride mit Starter/Generator von Honda. Ein serieller Hybrid ist noch nicht als Serienfahrzeug verfügbar. Da die Technik konzeptionell eher einfacher ist als in den übrigen Hybriden, sollten keine antriebstechnischen Probleme bestehen; allerdings werden z. B. in Kolke (2004) sehr viel höhere Kosten als für parallele Hybride abgeschätzt. Ursache dürfte sein, dass die einzelnen Komponenten größer ausgelegt werden müssen als in den anderen Hybridkonzepten. Es ist zu vermuten, dass noch keine realistischen Einsatzbereiche identifiziert sind, für die der permanente Elektroantrieb auch tatsächlich ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist. Eine erfolgreiche Realisierung des Freikolbenlineargenerators könnte die Einschätzung für serielle Hybride ggf. deutlich ändern.

Für Misch- und milde Hybride kann von einer kontinuierlichen Ausdehnung der aktuellen Marktanteile ausgegangen werden. Für serielle Hybride sind Aussagen zu Markteintritt und -durchdringung kaum möglich.

Aktuell können nur für den Honda Civic Mehrkosten bzw. genauer: Preisaufschläge angegeben werden, da für die übrigen Hybride keine konventionellen Varianten angeboten werden. Sie liegen mit 6 000 Euro bei mehr als 33 Prozent. Angesichts des maßvollen technischen Zusatzaufwandes bei milden Hybriden erscheint dies sehr viel. Umgekehrt scheint der Prius – ohne direkten Vergleich mit einem konventionellen Prius – relativ preiswert (ab 23 900 Euro; der Prius wird sowohl von Toyota als auch von Unabhängigen häufig mit dem Toyota Avensis verglichen, der praktisch zum gleichen Preis erhältlich ist). Für zukünftige Hybride werden Mehrkosten im Bereich von 5 bis 15 Prozent (mild), 10 bis 25 Prozent (parallel) bzw. 30 bis 50 Prozent (seriell) im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen erwartet (jeweils auf 5 Prozent gerundet) (Kolke 2004; Ricardo 2003).

Zukünftige Entwicklungsschwerpunkte liegen aus heutiger Sicht bei der weiteren Optimierung der Systemauslegung und des Antriebsmanagements, für serielle Hybride evtl. auch in der Auswahl und Anpassung anderer Verbrennungsmaschinen (Turbine, 2-Takt-Motor).

Tabelle 12

Verbrauchsdaten zum Toyota Prius (Herstellerangaben)

Quellen, Testzyklen	Prius 1997	Prius 2000	Prius 2004	konv. Otto-PKW	Prius 2004/ konv. Otto-PKW
VDI N 2005*					
ECE			5,0	(7,5)	
EUDC			4,2	(4,9)	
NEFZ			4,3	(5,8)	
Praxis-Betrieb			5,5	(6,1)	
Toyota 2004a					
Jap. 10–25 mode	3,57	3,45	2,80	6,02	*46,5 %*
„EU mode“		5,10	4,30	7,80	*55,1 %*
Toyota 2004b					
Wirkungsgrad	*28 %*	*32 %*	*37 %*	*16 %*	*230 %*
Vebrauchsreduktion Stadt					bis *60 %*
Vebrauchsreduktion ao/AB					bis *10 %*

* konventioneller PKW: Toyota Avensis Diesel
Verbrauchsangaben in Liter/100 km
ECE: Innerortsteil des NEFZ; EUDC: Außerortsteil des NEFZ; NEFZ: Neuer europäischer Fahrzyklus;
„EU mode“: wahrscheinlich NEFZ; AB: Autobahn; ao: außerorts
Quelle: nach IFEU 2005a

Fazit

Spezifische Verbrauchsreduktionen und Kosten (relevant für die Markt- bzw. Flottendurchdringung) lassen für Hybridfahrzeuge erhebliche Potenziale zur CO_2-Reduktion erwarten, mit deren Erschließung durch die Markteinführung einzelner Fahrzeuge bereits begonnen wurde. Diese Potenziale liegen allerdings vor allem im Innerortsbereich, für den auch andere Optionen relevant sind. Durch das ungünstigere Teillastverhalten von Ottomotoren ist das Potenzial der Hybridisierung außerdem für Ottofahrzeuge größer als für Dieselfahrzeuge.

6. Elektromotor mit Batterie

Reine batteriebetriebene Elektromobile finden in kaum einer der bislang ausgewerteten Studien zu „Allzweck“-KFZ Berücksichtigung. Sie gelten heute als Nischenfahrzeuge (u. a. Stan 2005) mit dem einzigen Vorteil des emissionsfreien Betriebs. Der Grund liegt in der auch mit modernen Batterietypen geringen Reichweite bei hohen Kosten. Damit besteht aufgrund der auch zukünftig äußerst geringen Gesamtfahrleistung nur ein geringes CO_2-Minderungspotenzial. Bei einem – derzeit allerdings nicht absehbaren – Durchbruch in der Batterietechnologie müsste diese Einschätzung einer Überprüfung unterzogen werden.

Technische Minderungspotenziale bestehen prinzipiell bei allen Verlusten in Batterie, Leistungselektronik und Motor. Davon abgesehen, dass insbesondere Elektromotoren weitgehend ausgereift sind, dürften die Entwicklungen der Komponenten eher durch die Anwendung in Hybrid- und BZ-Fahrzeugen motiviert sein. Deshalb und aufgrund der geringen fahrleistungsbedingten Potenziale werden Batterie-E-Mobile hier nicht weiter betrachtet.

7. Elektromotor mit Brennstoffzelle

E-Mobile mit Brennstoffzellen (BZ) gelten als zukunftsweisendes Fahrzeugkonzept. Serienfahrzeuge existieren bislang nicht. Für den Fahrzeugantrieb werden vor allem Polymer-Elektrolyt-Membran(PEM)-BZ untersucht, die sich durch hohe Leistungsdichte und flexibles Betriebsverhalten auszeichnen. Für PEM-BZ in Fahrzeugen lassen sich brennstoffbezogen drei Konzepte unterscheiden: Reinwasserstoff (gespeichert als Flüssig- oder Druckwasserstoff), wasserstoffhaltiges Brenngas aus dem „onboard reforming“ von Methanol oder Kohlenwasserstoffen und Direktumsetzung von Methanol in speziellen BZ (DMBZ). Der Betrieb von BZ-Fahrzeugen mit Reinwasserstoff ist völlig frei von Schadstoffemissionen, der mit Methanol oder Kohlenwasserstoffen fast frei.

Unter Effizienzaspekten ist Wasserstoff der Brennstoff der Wahl; problematisch sind die Speicherung an Bord und die fehlende H_2-Infrastruktur. Wasserstoffspeicher sind deutlich schwerer und um ein Vielfaches teurer als Tanks für Methanol oder Benzin und werden dies mit einiger Wahrscheinlichkeit auch bleiben. Dies gilt sowohl für die relativ weitentwickelten Tanks für Druck- und

Flüssigwasserstoff als auch für andere Konzepte, bei denen noch sehr großer FuE-Bedarf besteht, wie Metallhydride, Kohlenstoff-Nanofasern, Eisenschwamm und Mikroglaskugeln. Methanol und andere Kohlenwasserstoffe sind leicht zu speichern, erfordern aber Reformer oder alternativ für Methanol spezielle, noch nichtausentwickelte BZ. Hinsichtlich der Wasserstoffqualität (Reinheit) ist anzumerken, dass die Anforderungen von BZ deutlich höher sind als die von H_2-VKM.

Verluste treten an allen Komponenten von BZ-Systemen auf. Entsprechend sind an allen Komponenten Wirkungsgradverbesserungen möglich. Die wesentlichen Verlustprozesse sind:

– Umwandlungsverluste: Ein Teil des Brennstoffs wird in Wärme statt in Strom umgewandelt.

– Eigenverbräuche: Stromverbrauch z. B. von Pumpen und Kompressoren.

– Reformingverluste: Bei der Konversion von Methanol oder Kohlenwasserstoff zu Wasserstoff treten Verluste auf.

– Unvollständige H_2-Umsetzung: In Brennstoffzellen, die mit Reformat aus Methanol oder Kohlenwasserstoffen betrieben werden, bleibt ein Teil des Wasserstoffs unumgesetzt, wenn eine bestimmte H_2-Konzentration unterschritten wird. Das Abgas der Brennstoffzelle kann allerdings noch genutzt werden, um den Reformer zu beheizen.

Die Weiterentwicklung von BZ basiert zum großen Teil auf der Forschung und Entwicklung im Bereich der Materialwissenschaften. Ein prominentes Beispiel ist die Schlüsselkomponente der PEM-BZ: die Membran. Membranmaterialien, die höhere Temperaturen als die üblichen Materialien tolerieren, erlauben entsprechend höhere Betriebstemperaturen, was zu einer geringeren CO-Empfindlichkeit und damit höheren Aktivität der Elektroden und geringeren Anforderungen an die Reinheit des Wasserstoffs führt (sowohl bei Rein-H_2 als auch Reformat aus Methanol oder Kohlenwasserstoffen). Für DMBZ sind höhere Temperaturen ebenfalls günstig.

Die Umsetzung von Methanol oder Kohlenwasserstoffen in Reformern wird durch das Reformerdesign, die Einspritztechnik sowie die Reaktionsbedingungen beeinflusst und kann optimiert werden. Auch konventionelle Komponenten wie Pumpen und deren Teile wie z. B. Lager sind optimierbar (NRW 2004; Vielstich et al. 2003). Schließlich ist die Systemintegration wesentlich für energieeffiziente BZ-Fahrzeuge.

Auch für BZ werden Hybridkonzepte diskutiert. „Hybrid“ bezieht sich dabei allerdings nur auf die Speicherung von Strom in Batterien, nicht auf einen zusätzlichen Typ von Antriebsmaschine. Wie bei Hybridverbrennern dient die Batterie der Rekuperation von Bremsenergie und unterstützt den Betrieb der BZ in ungünstigen Lastbereichen.

Für eine Bewertung der verschiedenen Konzepte ist es ungünstig, dass den genannten Einzelaspekten keine konkreten Beiträge der Wirkungsgradverbesserung zugeordnet werden können. Die Tabellen 13 und 14 fassen die Einsparpotenziale verschiedener BZ-Konzepte und die geschätzten Zusatzkosten zusammen.

Tabelle 13

Brennstoffzellenfahrzeuge: Verbrauchsreduktion (2010) bezogen auf Otto-PKW (2003)

Konzept	**NEFZ MJ/km**	**io MJ/km**	**ao MJ/km**	**AB MJ/km**
S-Hybrid-Methanol-BZ	*- 65 %*	*- 68 %*	*- 59 %*	*- 67 %*
BZ-Methanol	*- 57 %*	*- 62 %*	*- 49 %*	*- 55 %*
DMBZ-Methanol	*- 57 %*	*- 62 %*	*- 49 %*	*- 55 %*
BZ-CGH_2	*- 68 %*	*- 74 %*	*- 60 %*	*- 62 %*
BZ-LH_2	*- 68 %*	*- 74 %*	*- 60 %*	*- 62 %*

NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus; io: innerorts; ao: außerorts; AB: Autobahn;
S: seriell; BZ: Brennstoffzelle; CGH_2: Compressed Gaseous Hydrogen; DMBZ: Direktmethanol-BZ;
LH_2: Liquid Hydrogen
Quelle: Kolke 2004, nach IFEU 2005a

Tabelle 14

Brennstoffzellenfahrzeuge: Zusatzkosten (2010) bezogen auf Otto-PKW (2003)

Konzept	Antriebsstrang	Gesamtfahrzeuge	Treibstoff (NEFZ)	Gesamtkosten
S-Hybrid-Methanol-BZ	*255 %*	*53 %*	*- 41 %*	*35 %*
BZ-Methanol	*78 %*	*16 %*	*- 28 %*	*8 %*
DMBZ-Methanol	*93 %*	*19 %*	*- 19 %*	*12 %*
BZ-CGH_2	*133 %*	*27 %*	*- 9 %*	*20 %*
BZ-LH_2	*92 %*	*19 %*	*9 %*	*17 %*

NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus; S: seriell; BZ: Brennstoffzelle; CGH_2: Compressed Gaseous Hydrogen; DMBZ: Direktmethanol-BZ; LH_2: Liquid Hydrogen
Quelle: Kolke 2004, nach IFEU 2005a

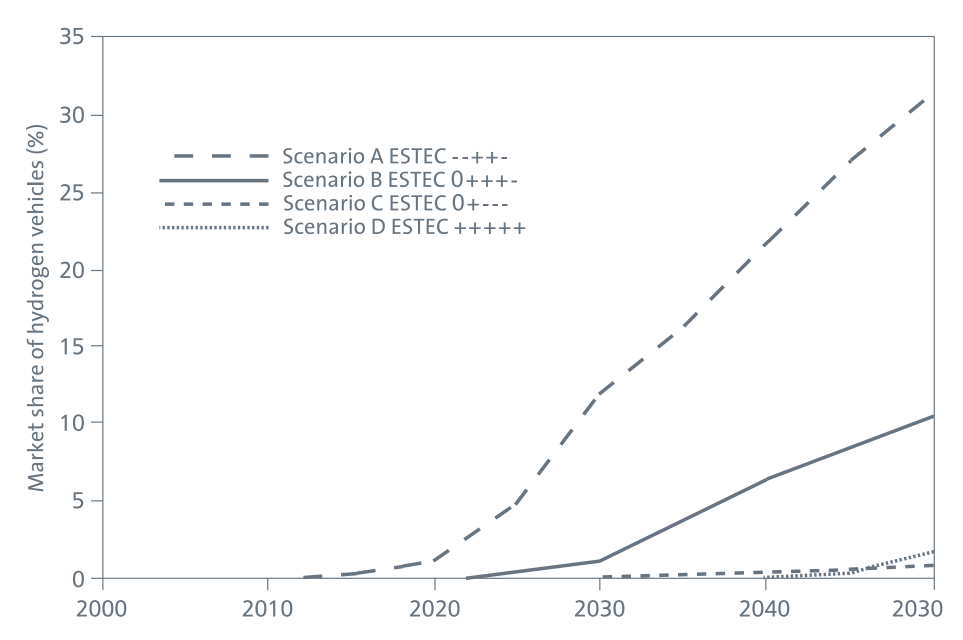
Entwicklungsstand und Perspektiven

Brennstoffzellenfahrzeuge sind in allen Varianten – Brennstoff (Rein-H_2, H_2 aus „on-board reforming“, Methanol), H_2-Speichertyp, Art der Methanolkonversion – noch weit von einer Markteinführung entfernt. Mit einer Markteinführung ist für kein Konzept vor 2010 zu rechnen. In BMBF (2004) wird von einer nennenswerten Marktdurchdringung frühestens nach 2020 ausgegangen. In Ricardo (2003) werden für zwei Szenarien 2020 bzw. 2030 genannt. Auch die Internationale Energieagentur hat Szenarien für die Marktdurchdringung von BZ-Fahrzeugen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen entwickelt. Im günstigsten Fall (Szenario D in der Abbildung 6) startet die Markteinführung um 2015; einen Marktanteil von etwa 10 Prozent an den Neuzulassungen erreichen BZ-Fahrzeuge um das Jahr 2030.

Welche Konzepte überhaupt und in welcher Reihenfolge auf den Markt kommen werden, wird stark davon abhängen, welche Kraftstoffe von den relevanten Akteuren favorisiert werden. Dabei bestehen natürlich Rückkopplungen zum erforderlichen Entwicklungsaufwand für die entsprechenden BZ-Konzepte. Tendenziell erscheinen BZ-Fahrzeuge mit Rein-H_2 als Brennstoff zurzeit deutlich zukunftsträchtiger als solche mit H_2-haltigen Brenngasen aus Methanol oder Benzin bzw. mit Direktumsetzung von Methanol.

Abbildung 6

Marktanteil von Brennstoffzellenfahrzeugen



PKW und leichte NFZ
Quelle: IEA 2005

Entwicklungsbedarf besteht bei allen Komponenten, insbesondere auch unter dem Aspekt der Kostensenkung. In den wichtigsten Studien wird von Mehrkosten gegenüber konventionellen Fahrzeugen von 15 bis 30 Prozent ausgegangen. Die Angaben sind allerdings mit Vorsicht zu betrachten. Sie sind insbesondere deutlich unsicherer als die Angaben zu VKM-Elektrohybriden.

8. Nichtmotorische Verbesserungen des Antriebsstranges

Zum Antriebsstrang zählen neben dem Motor u. a. sämtliche Komponenten, die die mechanische Arbeit des Motors zu den bzw. auf die Räder übertragen (z. B. Getriebe/ gesamter Gelenkwellenmechanismus). Getriebe dienen auch dazu, durch verschiedene Übersetzungen ein dem Fahrzustand angepasstes Drehmoment zu liefern (z. B. beim Beschleunigen). Durch eine höhere Anzahl von Übersetzungen kann der Betriebspunkt des Motors häufiger in Bereiche mit besseren Wirkungsgraden verschoben werden (CARB 2004). Daher werden in Zukunft sowohl Automatik- als auch Schaltgetriebe häufiger über sechs Gänge verfügen. Automatisierte Schaltgetriebe, bei denen der manuelle Schaltvorgang hydraulisch oder elektrisch unterstützt wird, weisen große Potenziale zur Kraftstoffeinsparung auf. Einen anderen Ansatz stellen stufenlose Getriebe (Continuously Variable Transmission, CVT) dar. Bei diesen kann das Übersetzungsverhältnis nahezu beliebig und stufenlos verändert werden.

Startergeneratoren werden in Zukunft die heute noch getrennten Aggregate zum Starten des Motors und zur Stromerzeugung in einem Gerät vereinen. Mit Startergeneratoren kann beim Bremsen Energie aufgenommen und der Motor während Leerlaufphasen abgeschaltet werden. Mithilfe der gespeicherten Energie kann er anschließend wieder schnell gestartet werden (Start-Stopp-Automatik). Grundsätzlich ist je nach Auslegung des Startergenerators auch eine Assistenz des Motors während der Beschleunigungsvorgänge möglich (CARB 2004). Durch die Vermeidung von Leerlaufzeiten und die Rückgewinnung von Bremsenergie kann der Kraftstoffverbrauch deutlich reduziert werden. Zusätzlich können Startergeneratoren einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Kaltstartemissionen (vor allem Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid) des Verbrennungsmotors leisten (DLR 2003). Startergeneratoren, die den Verbrennungsmotor beim Anfahren unterstützen, zählen prinzipiell zu den Hybridantrieben, die in Kapitel IV.5 näher betrachtet werden.

Tabelle 15

Stufenloses Getriebe (CVT)

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*8*	*7*	*8*	*8*	*5*
Kosten (US-Dollar)	0	0	0	0	0

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2012, Basisjahr 2002

Tabelle 16

Startergenerator

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*7*	*4*	*4*	*4*	*5*
Kosten (US-Dollar)	560	560	560	560	560

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2013 bis 2015, Basisjahr 2002

9. Verbesserungen der Nebenverbraucher

Neben der zur eigentlichen Fortbewegung notwendigen Energie muss immer auch Energie für sogenannte Nebenverbraucher bereitgestellt werden. Teilweise sind diese zwingend erforderlich, wie z. B. im Fall von Motorkühllüftern. Andere Nebenverbraucher, wie z. B. Lichtmaschinen oder diverse Überwachungselektroniken (ABS, ESP etc.), sind sicherheitsrelevant und deswegen kaum verzichtbar. Klimaanlagen, Sitzheizung, Unterhaltungselektronik etc. stellen hingegen Verbesserungen des Fahrkomforts dar.

Einige Nebenverbraucher sind bei Verbrauchsangaben von KFZ nicht enthalten; der NEFZ sieht die Zuschaltung vieler Verbraucher bei der Prüfung nicht vor. Somit beruhen Angaben zu Verbrauchswerten von zusätzlichen Nebenverbrauchern häufig auf Schätzungen oder Erfahrungswerten. Die ausgewertete Literatur zeigt zudem, dass Nebenverbraucher nicht im Fokus von Verbrauchsreduktionen bei KFZ stehen. Über Einsparpotenziale von zusätzlichen Verbrauchern liegen daher kaum Daten vor.

Die Leistungsaufnahme und auch die Verwendung von Nebenverbrauchern sind recht unterschiedlich. Der Motoranlasser z. B. hat eine Leistungsaufnahme von etwa 2 kW, wird allerdings nur kurzzeitig gebraucht. Andere elektrische Nebenverbraucher wie die Heckscheiben- oder die Sitzheizung (je ca. 150 W) haben eine geringe Leistung, werden aber länger oder wie im Falle der elektrischen Fensterheber (ebenfalls ca. 150 W) häufiger benutzt. Als einer der größten Nebenverbraucher im Fahrzeug hat sich die zunehmende Klimatisierung (6 bis 10 kW) von Fahrzeugen entwickelt.

Die Benutzung von Klimaanlagen kann bei Kraftfahrzeugen unter durchschnittlichen Bedingungen (gemittelt über Nord-, Zentral- und Südeuropa) zu einem Kraftstoffmehrverbrauch von ca. 5 Prozent führen mit entsprechenden Treibhausgasemissionen (EU-Kommission 2003). Viele Klimaanlagen, die heute im KFZ-Bereich eingesetzt werden, sind starre Systeme, deren Kühlleistung über die Drosslung des Kühlmediums geregelt wird. Dadurch haben diese Klimaanlagen relativ hohe energetische Verluste. Durch variable Einstellungen des Kompressors oder durch Rezirkulation von Innenraumluft können diese Verluste reduziert werden. Effizientere elektrische Wärmepumpen bieten weiteres Einsparpotenzial, ihr Einsatz setzt allerdings eine 42-Volt-Stromversorgung an Bord des Fahrzeuges voraus.

Eine andere Quelle von Treibhausgasemissionen bei Klimaanlagen sind Leckagen, aus denen Kühlmittel austreten kann. Die heute verwendeten Kühlmittel sind häufig teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (z. B. HFC 134a), die z. T. ein hohes Treibhauspotenzial aufweisen. Der Einsatz weniger klimawirksamer Kühlmittel (z. B. CO_2) oder die bessere Abdichtung der Kühlleitungen sind hier Maßnahmen, die Treibhausgasemissionen aus Klimaanlagen zu reduzieren.

Zur Strombereitstellung für die Nebenverbraucher werden auch Brennstoffzellen als APU (Auxiliary Power Unit) in konventionellen Fahrzeugen diskutiert, allerdings ohne verwertbare Angaben zum Einfluss auf den Gesamtverbrauch von Fahrzeugen.

Tabelle 17

Optimierte Klimaanlage

	PKW klein	PKW groß	Minivan	LKW klein	LKW groß
CO_2-Minderung (%)	*2,4*	*2,3*	*2,5*	*2,2*	*1,9*
Kosten (US-Dollar)	88	88	88	88	88

Quelle: CARB 2004, zurückgehend auf NESCCAF 2004, Zeithorizont 2012, Basisjahr 2002

10. Reduktion der Fahrwiderstände

Neben der Antriebseffizienz sind auch die physikalischen Fahrwiderstände für den Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen von Bedeutung. Diese treten vor allem dann in den Vordergrund, wenn keine alternativen Antriebstechnologien zur Verfügung stehen (z. B. bei Flugzeugen) oder bereits ein sehr hohes Effizienzniveau der bestehenden Technik erreicht ist und keine entscheidenden Innovationen zu erwarten sind (z. B. Elektromotoren im Schienenverkehr).

Die physikalischen Fahrwiderstände und das Fahrmuster bestimmen zunächst den Bedarf an Energie, die dann von der Antriebstechnik möglichst effizient zur Verfügung gestellt werden muss. Der Energieverbrauch und die potenziellen Einsparmöglichkeiten variieren daher mit dem Fahrzeugtyp und dem Nutzungsmuster. Die wichtigsten Widerstände für Straßen- und Schienenfahrzeuge sind:

– Rollwiderstand

– Steigungswiderstand

– Beschleunigungswiderstand (Trägheit)

– Luftwiderstand

Mit Ausnahme des Luftwiderstands sind alle Widerstände direkt proportional zur Fahrzeugmasse. Leichtbau bietet sich daher als eine zentrale Möglichkeit an, den Fahrwiderstand zu verringern. Diese Möglichkeit ist aufgrund der häufigen Beschleunigungen besonders für Fahrzeuge im Stadtverkehr (PKW, U-Bahnen u. a.) aber auch für Flugzeuge von Bedeutung. Der Luftwiderstand hängt von der Frontfläche und den Oberflächeneigenschaften des Fahrzeugs und der Geschwindigkeit ab. Eine Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften ist daher vor allem bei Fahrzeugen mit hoher Geschwindigkeit (Autobahnfahrten, Hochgeschwindigkeitszüge) interessant. Bei Straßenfahrzeugen kann auch der Rollwiderstand optimiert werden. Eine Verbesserung ist hier jedoch durch sicherheitstechnische Aspekte limitiert.

Leichtbau

Leichtbau strebt eine möglichst große Gewichtseinsparung an Fahrzeugen an. Als Folge davon können häufig auch die Antriebstechnik und die mitgeführte Kraftstoffmenge angepasst werden („downsizing“). Leichtbau kann dabei auf stofflichem Weg (Materialsubstitution), durch Formgebung (Minimierung des Werkstoffeinsatzes) und konzeptionell (Reduktion der Teilezahl) realisiert werden.

Im Stoffleichtbau werden Materialien wie z. B. Aluminium, Magnesium und Titan verwendet. Kunststoffe, vor allem Faserverbundwerkstoffe, gewinnen durch sinkende Preise zunehmend an Bedeutung. Heute sind diese im Preis etwa mit Metallen vergleichbar, können in der Regel auch anders verarbeitet werden und bieten so neue Gestaltungsmöglichkeiten.

Die Herstellung einiger Leichtbaumaterialien wie z. B. Aluminium ist mit einem, gegenüber herkömmlichen Materialien, höheren Energieaufwand und höheren CO_2-Emissionen verbunden. In ihrer ökologischen und ökonomischen Gesamteffektivität lassen sich verschiedene Leichtbaumaßnahmen häufig nur im Rahmen von Ökobilanzen vergleichen und beurteilen.

Für die Nutzungsphase gibt es zahlreiche Daten zu möglichen Kraftstoffeinsparungen durch Leichtbau für die verschiedenen Verkehrsträger. Für PKW streuen die Schätzungen für Kraftstoffeinsparungen bei einer Gewichtsreduktion um 100 kg zwischen 0,1 l und 0,5 l/100 km (IFEU 2003a). Nach OECD/IEA (2005) sind Gewichtsreduktionen von 5 bis 10 Prozent möglich. Dadurch können Verbrauchssenkungen von etwa 3,5 bis 7 Prozent realisiert werden. Für Liefer-LKW im Stadtverkehr führen 33 Prozent Gewichtsreduktion zu 30 Prozent Kraftstoffeinsparungen (DoE 2000). Bei Bahnfahrzeugen werden für eine Gewichtsreduktion um 10 Prozent Energieeinsparungen von 7 Prozent für Regionalzüge, 6,6 Prozent für U-Bahnen sowie 3,2 Prozent für ICE angegeben (Büttner/Heyn 1999). Besonders relevant ist Leichtbau natürlich für Flugzeuge: bei einer Gewichtsreduktion um lediglich 1 kg werden jährliche Kraftstoffeinsparungen von 117 bis 134 kg Kerosin bei Kurzstreckenflugzeugen und von 172 bis 212 kg Kerosin bei Langstreckenflugzeuge angegeben (Lufthansa 2003).

Luftwiderstand

Der Luftwiderstand spielt vor allem bei hohen Geschwindigkeiten eine wichtige Rolle. Eine Optimierung ist daher für Fahrzeuge im Fernverkehr (Sattelschlepper, Hochgeschwindigkeitszüge) von besonderer Bedeutung. Im Stadtverkehr (Lieferwagen, Stadtbusse) spielt der Luftwiderstand aufgrund der geringen Endgeschwindigkeiten dagegen eine deutlich geringere Rolle.

Neben der Geschwindigkeit sind hier die Frontfläche und der sogenannte c_w-Wert (Luftwiderstandsbeiwert), der die aerodynamische Güte (Windschlüpfigkeit) eines Körpers kennzeichnet, von Bedeutung. Da die Frontfläche in direktem Zusammenhang mit dem im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Raum steht, sind ohne Komforteinbußen Minderungen nur begrenzt möglich. Eine weitere Reduktion des c_w-Wertes durch Oberflächenverbesserungen und Verkleidungen ist jedoch durch Details in der Fahrzeugformgebung (Dachwölbungen, Spoiler etc.) möglich.

Für PKW wird eine Reduktion des Luftwiderstands um 10 bis 20 Prozent für möglich gehalten mit dem Effekt von 2 bis 4 Prozent Verbrauchssenkung (OECD/IEA 2005). Für leichte Nutzfahrzeuge soll eine Reduktion des Luftwiderstands um 10 Prozent etwa 1 bis 2 Prozent Verbrauchssenkung ergeben (NRC 2002). Bei schweren Nutzfahrzeugen kann eine Reduktion des Luftwiderstands um 20 Prozent den Verbrauch bei konstanter Autobahnfahrt um 10 Prozent senken (DoE 2004). Für Personenzüge wird angegeben: Eine Verkleidung des Drehgestells bewirkt 5 bis 10 Prozent weniger Energieverbrauch; eine Verkleidung an Seiten und Dach 2 bis 5 Prozent (bei Hochgeschwindigkeitszügen bereits umgesetzt) (UIC 2005).

Rollwiderstand

Der Rollwiderstand bei Straßenfahrzeugen entsteht vorwiegend durch elastische Verformung der Reifen. Sogenannte „Leichtlaufreifen“ reduzieren den Rollwiderstand und führen so zu Verbrauchssenkungen. Neben der tragenden Funktion erfüllen Fahrzeugreifen auch eine wichtige Funktion bei Beschleunigungs- und Bremsvorgängen. Eine Reduktion des Rollwiderstandes muss daher sorgfältig gegenüber sicherheitsrelevanten Aspekten abgewogen werden.

Eine Reduktion des Rollwiderstands um bis zu 30 Prozent wird für möglich gehalten mit einer resultierenden Verbrauchssenkung um 2 bis 6 Prozent bei PKW (abhängig von der Fahrgeschwindigkeit) (SRU 2005). Bei Nutzfahrzeugen ist das Potenzial mit 4 bis 12 Prozent etwas höher (Friedrich 2002).

V. Kraftstoffe und Energieträger

Dieses Kapitel widmet sich der Analyse der Leitfrage, welche alternativen Kraftstoffoptionen und deren Herstellungspfade inklusive der notwendigen Infrastruktur (Well-to-Tank, WtT) das Potenzial besitzen, zukünftig in relevantem Umfang zu einem CO_2- und emissionsarmen Verkehr in Deutschland beizutragen. Eine wesentliche Grundlage dieses Kapitels ist das Gutachten Öko-Institut (2005a).

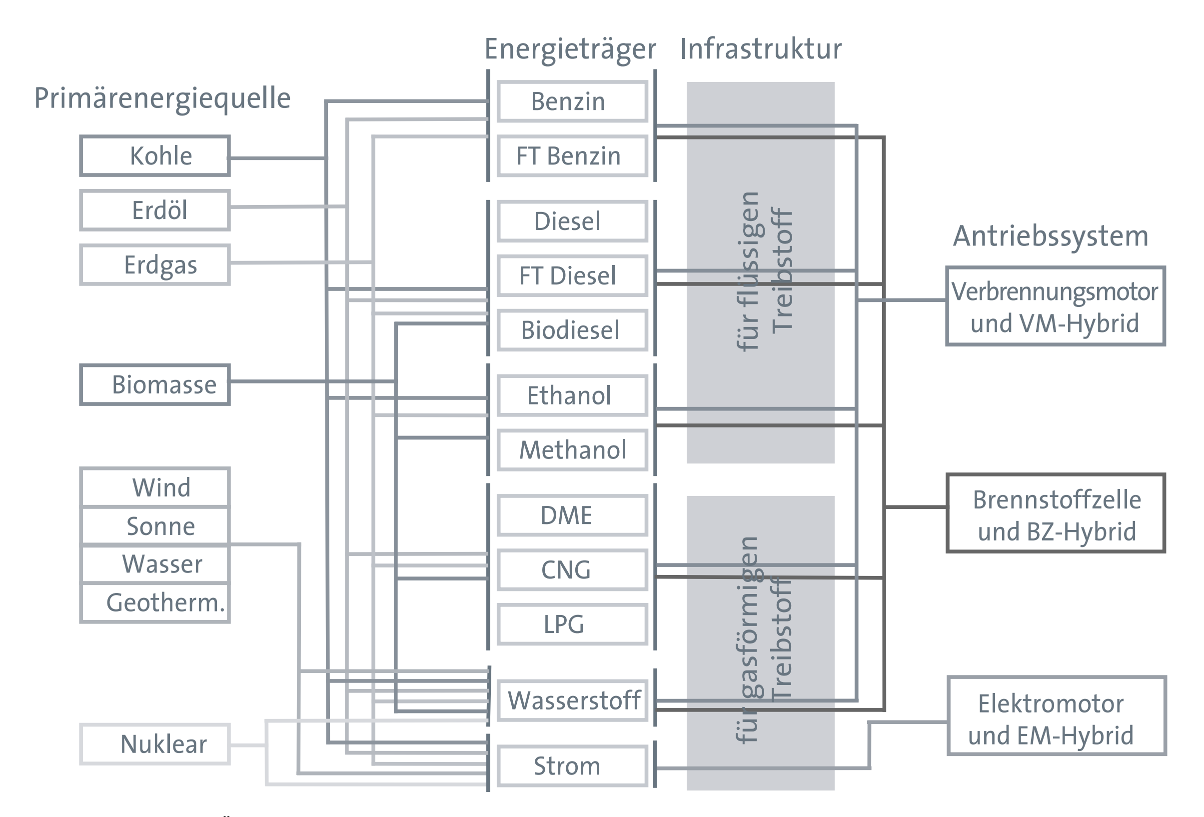
Derzeit werden international und national schwerpunktmäßig etwa zehn verschiedene alternative Kraftstoffe mit einer Vielzahl möglicher Erzeugungswege in Kombination mit verschiedenen Antriebstechnologien (wie optimierte konventionelle Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen) bezüglich ihrer potenziellen Beiträge zu einer nachhaltigeren Mobilität diskutiert (vgl. z. B. Kraftstoffmatrix 2004). Abbildung 7 gibt einen Überblick der Vielfalt der aktuell häufig diskutierten Optionen.

Neben den konventionellen Kraftstoffen Benzin und Diesel sind bereits einige weitere Kraftstoffe marktgängig. Hierzu gehören Erdgas und verschiedene Formen von Kraftstoffen aus Biomasse. Noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindlich sind vor allem die über die Fischer-Tropsch(FT)-Synthese aus Kohle, Erdgas oder Biomasse erzeugten synthetischen Kraftstoffe (Coal to Liquid, CtL, Gas to Liquid, GtL, und Biomass to Liquid, BtL) und Ethanol/Methanol, produziert aus lignozellulosehaltigen Pflanzen (z. B. Holz, Stroh). Wasserstoff kann prinzipiell aus allen Primärenergieträgern hergestellt werden.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden auf der Basis der aktuell verfügbaren Literatur die Kraftstoffoptionen

Abbildung 7

Mögliche Bereitstellungspfade für Kraftstoffe



Quelle: WBCSD 2004, nach Öko-Institut 2005a

ausgewertet im Hinblick auf die Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen sowie den Energiebedarf bei der Gewinnung des Primärenergieträgers, der Umwandlung beziehungsweise Aufbereitung des Kraftstoffs, der Speicherung und den Transportwegen zwischen diesen einzelnen Schritten.

Die Auswahl der Kraftstoffe bzw. Herstellungspfade, die ausführlicher dargestellt werden, erfolgte anhand folgender Kriterien:

Regionaler und zeitlicher Bezug

Betrachtet werden ausschließlich alternative Kraftstoffpfade, die für den deutschen Markt von Relevanz sind. Dies bedeutet, dass lediglich Kraftstoffe in die Betrachtung einbezogen werden, die in Deutschland herstellbar sind oder nach Deutschland importiert werden können. Dabei werden nur Kraftstoffe betrachtet, deren Herstellung und Distribution bis 2020 so weit technisch entwickelt ist bzw. sein kann, dass sie das Pilotstadium überschritten haben und für einen breiteren Einsatz zur Verfügung stehen.

Die Darstellung baut auf den Diskussionen der sogenannten „Kraftstoffmatrix“ der Bundesregierung auf (Kraftstoffmatrix 2004). Dort sind alle alternativen Kraftstoffe mit deren Herstellungspfaden (etwa 270) aufgeführt, die für Deutschland bis 2020 möglicherweise eine Relevanz besitzen werden.

Ökologische Effizienz

Es werden nur die Kraftstoffpfade weiter verfolgt, die gegenüber den Referenzkraftstoffen Vergaserkraftstoff und Diesel als „CO_2- oder emissionsarm“ gelten können.[5] Im Einzelnen bedeutet dies:

– Herstellungspfade, bei denen es offensichtlich ist, dass sich aus der verwendeten Primärenergiequelle ein anderer Kraftstoff effizienter und/oder mit geringeren THG-Emissionen herstellen lässt, wurden nicht weiter betrachtet. Bei diesem Schritt wurde auf die Vorarbeiten der „Kraftstoffmatrix“ zurückgegriffen.[6] Ausnahmen stellen Kraftstoffpfade dar, bei denen der Einsatz der umgewandelten Kraftstoffe mit der Perspektive der Zusammenführung der Ergebnisse zu WtW-Analysen in alternativen, effizienten Antriebstechnologien (z. B. Brennstoffzelle) im Vergleich zum direkten Einsatz des Energieträgers in Verbrennungsmotoren ökologische Vorteile in der WtW-Bilanz aufweist (z. B. bei Biomasse oder Erdgas und deren Umwandlung in Wasserstoff).

– Fossile Energiequellen werden nur dann in die Auswertung einbezogen, wenn sie emissionsärmer als die Referenzkraftstoffe Benzin und Diesel sind. Das ist beispielsweise der Fall bei Erdgas oder fossilen Energiequellen, bei denen eine CO_2-Abscheidung mittelfristig technisch denkbar und sinnvoll erscheint und durch die Speicherung (Sequestrierung) des CO_2 eine Minderung der THG-Emissionen gegenüber den Referenzkraftstoffen möglich ist.

– Potenzielle Importprodukte wie Ethanol aus Zuckerrohr (Brasilien) oder aus Palmöl (asiatischer Raum) werden ebenfalls nicht weiter analysiert, wenn deren direkte Nutzung in den Produktionsländern im Sinne des globalen Klimaschutzes und der Schonung energetischer Ressourcen sinnvoller ist (zum Thema Importe s. Kap. VIII).

Als Referenz werden die konventionellen Kraftstoffe Benzin und Diesel sowie Erdgas mit ihren Herstellungspfaden und zukünftigen Entwicklungspotenzialen ebenfalls berücksichtigt.

Mengenrelevanz und -potenziale

In die Literaturauswertung einbezogen werden zudem nur Kraftstoffpfade, die bis 2020 in relevanten Mengen im Markt vorhanden sein können und damit das Potenzial besitzen, langfristig nicht nur reine Nischenprodukte zu sein. Beispielsweise werden daher Biokraftstoffe aus Tierfetten und Abfallfetten nicht weiter betrachtet. Auch direkt eingesetzte Pyrolyseöle werden nicht berücksichtigt, da sie keinen signifikanten Anteil am deutschen Kraftstoffmarkt haben werden. Die Mengenpotenziale insbesondere von biogenen Kraftstoffen werden in Kapitel VII eingehender untersucht.

Anhand dieser Kriterien wurden die in Tabelle 18 dargestellten Kraftstoffpfade für eine vertiefte Analyse identifiziert. Es ergeben sich dabei folgende Schwerpunkte:

– Biokraftstoffpfade, die bereits umfassend bezüglich Energieverbrauch, THG- und Schadstoffemissionen und Kosten untersucht wurden. Es handelt sich hierbei vor allem um Biodiesel bzw. Pflanzenöl aus Raps sowie Ethanol aus Zuckerrüben bzw. Getreidekörnern (Pfade 1, 2 und 3).

– Biokraftstoffpfade, die mit hoher Wahrscheinlichkeit relevant bzw. interessant für den deutschen Markt werden könnten und die noch nicht abschließend untersucht bzw. erprobt wurden sowie verfahrenstechnisch noch nicht in großem Maßstab realisiert sind. Hier sind beispielsweise die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen (Fischer-Tropsch) aus Biomasse und Bioethanol aus Lignozellulose zu nennen. Ökologische und ökonomische Analysen sind für diese Pfade daher noch mit Unsicherheiten behaftet (Pfade 4 bis 7).

– Pfade zur Herstellung von methanreichem Gas aus Biomasse. Die Biogasherstellung ist im stationären Sektor bereits breit etabliert, aber im Hinblick auf die Nutzung als Kraftstoff sind die Herstellungspfade noch nicht ausreichend untersucht (Pfade 8 bis 11).

---

5 Entscheidend für die ökologische Effizienz sind natürlich die Emissionen entlang der gesamten Nutzungskette „Well to Wheels“ (WtW). Daher wurden bei der Auswahl der Kraftstoffpfade teilweise Ergebnisse der WtW-Analysen vorweggenommen.

6 So wurden z. B. sog. Hythane, ein Gemisch aus Erdgas und Wasserstoff, ausgeschlossen, da die direkte Nutzung von Wasserstoff im Vergleich günstiger ist.

– Kraftstoffpfade zur Herstellung von Wasserstoff, die z. T. großtechnisch erprobt (z. B. zentrale Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas) und z. T. in der Entwicklung sind (dezentrale Erzeugung an der Tankstelle). Hier spiegelt sich der Entwicklungsstand in Umfang und Qualität der vorliegenden Energie-, Umwelt- und Kostenbilanzen wider (Pfade 12 bis 15).

– Kraftstoffpfade, die ausgehend von fossilen Kraftstoffen eine CO_2-Sequestrierung unterstellen. Diese Pfade sind erst in der Erforschung, wobei der Schwerpunkt auf der Frage liegt, inwieweit das CO_2 so „deponiert“ werden kann, dass es dauerhaft der Umwelt entzogen ist (Pfade 16 bis 20; zur Technologie der Sequestrierung s. Anhang 4).

Tabelle 18

Übersicht der relevanten Kraftstoffpfade

Nr.	Primärenergie	Rohstoffbasis	Konversionsroute	Kraftstoff
1	Biomasse	Ölpflanzen (Raps, Sonnenblume)	Veresterung mit fossilem/biogenem Methanol	Biodiesel (FAME)
2	Biomasse	Getreidekörner	Vergärung	Ethanol
3	Biomasse	Zuckerrüben	Vergärung	Ethanol
4	Biomasse	Restholz	Synthesegas mit Fischer-Tropsch-Synthese	FT-Diesel
5	Biomasse	Energiepflanzen	Synthesegas mit Fischer-Tropsch-Synthese	FT-Diesel
6	Biomasse	Restholz, Stroh	Hydrolyse mit Vergärung via SSCF oder alt. Methoden	Ethanol
7	Biomasse	Energiepflanzen (Lignozellulose)	Hydrolyse mit Vergärung via SSCF oder alt. Methoden	Ethanol
8	Biomasse	Reststoffe	Vergärung, Aufbereitung	methanreiches Gas
9	Biomasse	Restholz	Vergasung, Umsetzung des Synthesegases	methanreiches Gas
10	Biomasse	Energiepflanzen	Vergasung, Umsetzung des Synthesegases	methanreiches Gas
11	Biomasse	Energiepflanzen	Vergärung, Aufbereitung	methanreiches Gas
12	Biomasse	Biogas (Reststoffe)	Reformierung	H_2
13	Biomasse	Restholz	Vergasung und Reformierung	H_2
14	Biomasse	Energiepflanzen	Vergasung/Vergärung und Reformierung	H_2
15	regenerative	Wind/Solar/Wasser/ Geothermie/ Biomasse	Elektrolyse	H_2
16	fossil + CO_2-Sequestrierung	Erdgas, Kohle	Synthesegas mit Fischer-Tropsch-Synthese	FT-Diesel
17	fossil + CO_2-Sequestrierung	Erdgas, Kohle	chem. Methanolsynthese	Methanol
18	fossil + CO_2-Sequestrierung	Erdgas, Kohle	chem. Synthese	DME
19	fossil + CO_2-Sequestrierung	Kohle	Synthesegas	methanreiches Gas
20	fossil + CO_2-Sequestrierung	Erdgas, Kohle	Vergasung	H_2
21	Biomasse	Restholz	chem. Methanolsynthese über Synthesegas	Methanol

noch Tabelle 18

Nr.	Primärenergie	Rohstoffbasis	Konversionsroute	Kraftstoff
22	Biomasse	Energiepflanzen	chem. Methanolsynthese über Synthesegas	Methanol
23	Biomasse	Restholz	Ethanol für ETBE-Synthese via Hydrolyse mit Vergärung via SSCF	ETBE
24	Biomasse	Energiepflanzen	Ethanol für ETBE-Synthese via Hydrolyse mit Vergärung via SSCF	ETBE
25	Biomasse	Getreidekörner	Vergärung	ETBE
26	Biomasse	Zuckerrüben	Vergärung	ETBE
27	Biomasse	Restholz	chem. Synthese über Synthesegas	DME
28	Biomasse	Energiepflanzen	chem. Synthese über Synthesegas	DME

FT: Fischer-Tropsch; SSCF: Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation; FAME: Fatty Acid Methyl Ester (Biodiesel); ETBE: Ethyltertiärbutylether; DME: Dimethylether
Quelle: nach Öko-Institut 2005a; vgl. auch Kraftstoffmatrix 2004

In der Tabelle ebenfalls mit aufgeführt sind Herstellungspfade (Pfade 21 bis 28) für Kraftstoffe, die derzeit für einen breiten Einsatz nicht favorisiert werden (z. B. DME), sowie Kraftstoffadditive (z. B. das Antiklopfmittel ETBE). Da ihr quantitatives Potenzial zur Kraftstoffsubstitution absehbar begrenzt ist, werden sie im Folgenden nicht umfassend analysiert.

Nach gründlicher Sichtung der existierenden Veröffentlichungen zum Thema wurden als Basis der Literaturauswertung die Quellen CONCAWE (2003), Öko-Institut (2004b), GEMIS 4.3 und IFEU (2004a) ausgewählt. Weitere aktuelle Veröffentlichungen, die in diesen Studien noch nicht enthalten sind oder aber weiter gehende Erkenntnisse bringen, vervollständigen die Betrachtung. Im Hinblick auf die Auswertung der Studien sowie die Darstellung, Interpretation und Rezeption der Ergebnisse sind einige wichtige Aspekte hervorzuheben:

– In vielen Studien wird nicht der fossile Energieverbrauch, sondern der gesamte Primärenergiebedarf der Kraftstoffvorkette (WtT) ausgewiesen. Relevante Ergebnisse werden daher erwähnt, aber nicht in die Übersichtstabellen mit aufgenommen, da der Primärenergiebedarf nicht in allen Fällen mit dem fossilen Energiebedarf vergleichbar ist.

– Für die Kraftstoffvorketten existieren nahezu keine miteinander vergleichbaren Studien zum Themenkomplex der Schadstoffemissionen (z. B. NO_x, SO_2, Partikel). Dies liegt zum Teil daran, dass es bei den Schadstoffemissionen im Gegensatz zu den Treibhausgasemissionen sehr stark auf den Ort der Emission ankommt. Im Rahmen von Öko-Institut (2004b) sind die Schadstoffemissionen verschiedener Biokraftstoffvorketten als troposphärische Ozonvorläufer-(TOPP)-Äquivalente und SO_2-Äquivalente in GEMIS 4.3 bilanzierbar. Für die Biokraftstoffe werden im vorliegenden Bericht diese beiden Indikatoren jeweils den Emissionen des entsprechenden fossilen Kraftstoffpendants gegenübergestellt.

– Bei den Kraftstoffkosten stellt sich die Quellenlage folgendermaßen dar: In CONCAWE (2003) werden zwar für einzelne Prozessschritte die Kosten beschrieben, es werden jedoch keine Gesamtkosten angegeben, sodass diese Veröffentlichung hier nicht verwendet werden kann. In IFEU (2004a) werden die Kosten für Biokraftstoffe mit der in der Literatur enthaltenen – teilweise erheblichen – Bandbreite angegeben. Die Bereitstellungskosten für Biokraftstoffe werden des Weiteren in VIEWLS (2005) ausgewiesen. Vervollständigt wird die Literatur zum Thema durch eine neue Veröffentlichung der IEA, in der ein Schwerpunkt auf den Kosten von Biokraftstoffen liegt (IEA 2005), und durch Studien zu zukünftigen Kraftstoffen, die zum Teil neben der Diskussion der technischen Realisierung auch die potenziellen Kosten abschätzen. Eine detaillierte Kostenbetrachtung für eine Vielzahl von Herstellungsarten für Wasserstoff gibt ISI (2003). Da eine direkte Vergleichbarkeit der Kostendaten in den verschiedenen Quellen nicht gegeben ist, ist eine ausführliche Diskussion von Gemeinsamkeiten bzw. Unterschieden nicht sinnvoll.

1. Konventionelle, fossile Kraftstoffe

Um die verschiedenen CO_2-armen Kraftstoffpfade mit denen der konventionellen Kraftstoffe vergleichen zu können, müssen auch die fossilen Vorketten betrachtet werden. Im Folgenden werden daher kurz der mit den Kraftstoffvorketten von Benzin, Diesel und Erdgas verbundene Energieverbrauch und die Emissionen dargestellt.

1.1 Benzin und Diesel

Benzin und Diesel gehören zu den Leicht- bzw. Mitteldestillaten der Raffinerien. Als Ausgangsstoff dient hierbei Rohöl, das dort in die entsprechenden Fraktionen aufgetrennt wird. Der Anteil der Fraktionen ist primär durch den Rohöltyp

festgelegt. So ist Nordseeöl oder nordafrikanisches Rohöl „leicht“, d. h. es weist einen hohen Anteil an Leicht- und Mitteldestillaten auf, während OPEC-Öl „schwer“ ist, d. h. einen deutlich höheren Anteil an Schweröl enthält. Durch weitere energieintensive Prozessschritte in der Raffinerie kann der Anteil an „leichten“ Fraktionen durch Aufarbeitung der Schwerölfraktion erhöht werden.

In Deutschland ist der Energieaufwand zur Herstellung von Benzin und Diesel im Vergleich zum EU-Durchschnitt höher, da der Anteil des Schweröls am Produktspektrum relativ klein ist.[7] Zusätzlich müssen weitere energieintensive Verarbeitungstechnologien eingesetzt werden, um die bestehenden Produktanforderungen (Schwefelgehalt, Benzolgehalt) zu erfüllen.

In Zukunft werden sich Energieaufwand und damit auch die Emissionen zur Herstellung von konventionellen Kraftstoffen wie Diesel und Benzin aufgrund verschiedener Trends aufseiten der Rohölqualitäten und der Raffinerien verändern. Wichtige zukünftige Entwicklungen sind:

– Der Anteil an Nordseeöl ist in den letzten Jahren bereits deutlich gesunken (Anteil 2005: 30 Prozent der Gesamtimporte), der Anteil aus den CIS-Staaten (Russland, Kasachstan: 43,5 Prozent) sowie aus Nordafrika (Lybien, Algerien: 16,6 Prozent) ist gestiegen. Es wird erwartet, dass sich dieser Trend fortsetzt. Verbunden damit ist eine Erhöhung der Emissionen aus der Vorkette, die im Vergleich zum Nordseeöl um den Faktor 5 (GUS) bzw. Faktor 2 (OPEC) spezifisch höher sind (GEMIS 4.3).

– Insgesamt ist zu erwarten, dass die deutschen Raffinerien vermehrt auf schwereres OPEC-Rohöl zurückgreifen müssen. Dadurch steigen die energetischen Aufwendungen, um ein ähnliches Produktspektrum zu erzeugen.

– Die Treibhausgasemissionen der Raffinerien sind seit 1990 von ca. 0,22 t CO_2/t Produkt auf ca. 0,17 t CO_2/t Produkt gesunken (MWV 2005). Seit 2002 zeigen die Emissionen jedoch einen Aufwärtstrend. Der Grund sind höhere Anforderungen an die Produkte, insbesondere an Diesel, und die damit verknüpften Aufwendungen. Es wird erwartet, dass sich diese Entwicklung in den kommenden Jahren verstärkt fortsetzt.

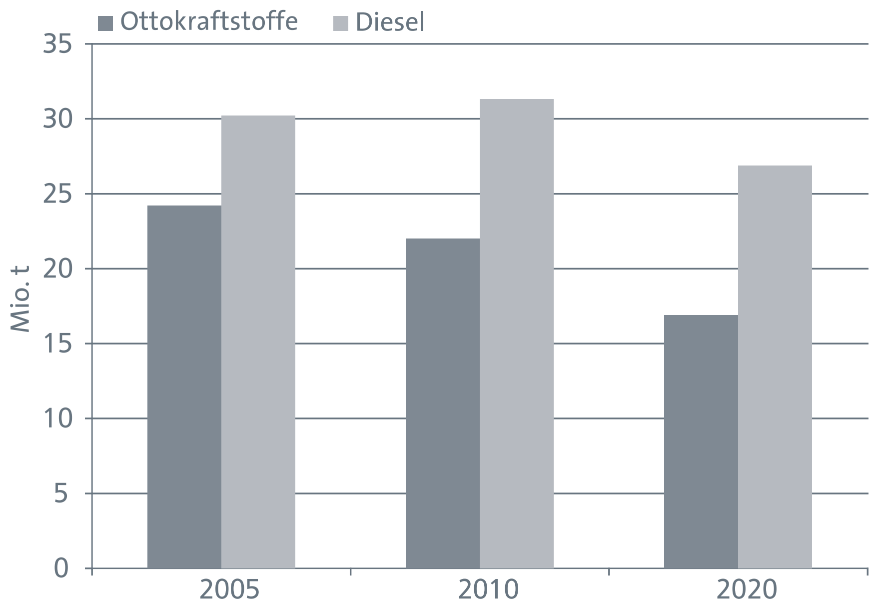
– Auch auf der Verbrauchsseite werden deutliche Änderungen prognostiziert, die eine deutliche Änderung in den Raffinerieprodukten zur Folge haben. Mit dem Trend zu Dieselfahrzeugen steigt der Anteil von Dieselkraftstoff (und leichtem Heizöl) und der Anteil von Ottokraftstoff nimmt ab (Abbildung 8). Insgesamt werden die energetischen Aufwendungen und damit die Emissionen zur Herstellung von Raffinerieprodukten auf Basis der Mitteldestillate tendenziell weiter zunehmen.

Der fossile Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen zur Herstellung von Benzin und Diesel sind in Tabelle 19 für das Jahr 2010 dargestellt. Die für Deutschland repräsentativen Ergebnisse basieren auf GEMIS-Daten, die wiederum auf Arbeiten des IFEU für die Mineralölwirtschaft beruhen. Die ebenfalls dargestellten Werte der CONCAWE-Studie (CONCAWE 2003) sind für die EU-15 berechnet (basiert z. B. auf dem westeuropäischen Raffineriepark) und sind daher für Deutschland nicht repräsentativ.

[7] Ein Grund für diese Entwicklung ist der Verzicht auf Schwerölkraftwerke nach der ersten Ölkrise in Deutschland. Dadurch war der Absatz dieses Raffinerieprodukts im Gegensatz zu anderen EU-Ländern deutlich reduziert.

Abbildung 8


Prognose des Benzin- und Dieselabsatzes in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung, nach Daten von MWV 2005

Tabelle 19

Kraftstoffvorkette von Otto- und Dieselkraftstoff: fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g CO_2äq/MJ_{out}
GEMIS 4.3	Ottokraftstoff 2010, S < 10 ppm	0,24	19,5
	Dieselkraftstoff 2010, S < 10 ppm	0,18	15,2
CONCAWE 2003	Ottokraftstoff 2010, S < 10 ppm	0,14	12,5
	Dieselkraftstoff 2010, S < 10 ppm	0,16	14,2

Quelle: Öko-Institut 2005a

1.2 Erdgas

Erdgas spielt eine nicht zu vernachlässigende Rolle als Kraftstoff für Fahrzeuge und soll laut europäischen Zielvorgaben im Jahr 2010 einen Anteil von 2 Prozent bzw. im Jahr 2020 von 10 Prozent am Kraftstoffverbrauch in Europa haben. Nach 2020 werden die europäischen Gasreserven nicht mehr den Gasbedarf in Europa decken können. Daher sind in CONCAWE (2003) zusätzlich zum heutigen Erdgasmix zwei Erdgaspfade berücksichtigt worden:

– Erdgas, das über Pipelines vor allem aus CIS-Staaten und Zentralasien nach Europa transportiert wird. Hierbei werden zwei Transportentfernungen berücksichtigt (4 000 und 7 000 km). Der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen nehmen aufgrund der steigenden Transportentfernung im Vergleich zum derzeitigen EU-Mix zu.

– „Remote gas“, das von verschiedenen Orten der Welt – vor allem dem arabischen Golf – in flüssiger Form per Schiff nach Europa transportiert wird.

Für das Jahr 2010 werden folgender fossiler Energiebedarf und folgende Treibhausgasemissionen für die Erdgasvorkette in CONCAWE (2003) und in GEMIS 4.3 ermittelt.

Durch den Aufbau einer flächendeckenden Tankstelleninfrastruktur schafft die deutsche Gaswirtschaft gegenwärtig die Voraussetzungen für eine weitere Verbreitung von Erdgas im Kraftstoffsektor. Die EU-Kommission hat vorgeschlagen, dass bis zum Jahr 2020 bis zu 10 Prozent des Kraftstoffbedarfs durch Erdgas gedeckt werden könnten (IPTS 2004b, S. 3 ff.).

Tabelle 20

Kraftstoffvorkette von Erdgas: fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g CO_2äq/MJ_{out}
CONCAWE 2003	CNG: EU-Mix	0,12	8,4
	CNG: 4.000 km Transportstrecke	0,19	14,6
	CNG: 7.000 km Transportstrecke	0,3	22,6
	LNG zu CNG, fl. Transport	0,26	20,3
GEMIS 4.3	Erdgas D 2010	0,16	12,1
	LNG aus Algerien frei DE (2010)	0,11	8,9

Quelle: Öko-Institut 2005a

2. Biokraftstoffe

Im folgenden Kapitel werden die in der Literatur aufgestellten Energie- und Treibhausgasbilanzen für Biokraftstoffe dargestellt. Hierbei erfolgt in Kapitel V.2.2 die Darstellung der jeweiligen Ergebnisse für die Biokraftstoffe, die bereits heute verfügbar sind. Das sind Biodiesel bzw. Pflanzenöl, Bioethanol aus zucker- bzw. stärkehaltiger Biomasse sowie Biogas. Kapitel V.2.3 enthält die Darstellung der Biokraftstoffe, die derzeit in der Entwicklungsphase sind (v. a. Kraftstoffe aus Synthesegas sowie Bioethanol aus holzartiger Biomasse).

2.1 Methodische Vorbemerkungen

Die verschiedenen Veröffentlichungen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen für Biokraftstoffe kommen zu stark differierenden Ergebnissen. Ursachen hierfür sind vor allem die Annahmen zur landwirtschaftlichen Produktion (energetischer Aufwand bei der Düngemittelproduktion, Düngemitteleinsatz, landwirtschaftliche Erträge und Definition des landwirtschaftlichen Referenzsystems[8]) und die Art der Berücksichtigung der anfallenden Koppel- und Nebenprodukte. Auch die zugrunde gelegten Verfahren zur Konversion der Rohstoffe (Anlagengröße, verwendete Verfahren und Energievorketten) haben einen Einfluss, der aber im Vergleich relativ gering ist.

Einen großen Einfluss auf die Bewertung der Treibhausgasemissionen haben die Annahmen zum landwirtschaftlichen Anbau der Biomasse. Stickstoffdioxid(N_2O)-Emissionen, die zum einen bei der Herstellung der stickstoffhaltigen Düngemittel und zum anderen direkt auf dem Feld entstehen (abhängig von Bodentyp, Klima, Anbaupflanze, Art des Düngers und Höhe des Düngemitteleinsatzes), werden dabei teilweise sehr unterschiedlich eingeschätzt. Die Spannbreite der Annahmen, die verschiedene Autoren für den Düngemitteleinsatz beispielsweise beim Anbau von Weizen ansetzen, reicht von 53 bis 195 kg Stickstoff/ha (IFEU 2004a).

Da N_2O ein 310-fach höheres Treibhausgaspotenzial als Kohlendioxid aufweist, können diese unterschiedlichen Annahmen zu großen Differenzen bei den Treibhausgasbilanzen führen.

Besonders kritisch bei der Bewertung der Kraftstoffvorketten ist die Berücksichtigung von anfallenden Koppelprodukten. Beispielsweise entsteht bei der Herstellung von Biodiesel als Koppelprodukt Glycerin. Dieses kann als hochwertiger Grundstoff z. B. in der Chemie- und Pharmaindustrie eingesetzt werden. In den einzelnen Studien werden diese Koppelprodukte zum Teil sehr unterschiedlich bilanziert, je nachdem, wie die Aufwendungen, Emissionen und Kosten auf die verschiedenen Produkte in der Prozesskette aufgeteilt werden. Problematisch bei der Bemessung der Koppelprodukte ist ferner, dass eine steigende Biokraftstoffnachfrage auch einen Anstieg bei der Produktion der Koppelprodukte mit sich bringt und so Rückkopplungseffekte entstehen, die einen großen Einfluss auf die ökonomische und ökologische Bewertung haben können.

In den diversen Publikationen kommen unterschiedliche Ansätze vor: Wenn Koppelprodukte bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt werden (zielproduktorientierte Methode), handelt es sich um den Worst-Case-Fall, da alle Aufwendungen dem Zielprodukt, also dem produzierten Kraftstoff, zugeschlagen werden. Beim Allokationsverfahren werden anhand geeigneter Bewertungsgrößen die entstehenden Umweltauswirkungen und Kosten auf das Zielprodukt und die Koppelprodukte aufgeteilt. Per Gutschriftenverfahren wird der anfallende Energie- und Kostengewinn anteilig dem Endprodukt zugeschrieben. Entsprechend arbeitet auch das Substitutionsverfahren, bei dem eine Gutschrift für das durch das Koppelprodukt substituierte Produkt erteilt wird. Die verschiedenen Verfahren können wie z. B. in Wagner/Igelspacher (2003) gegebenenfalls auch kombiniert werden.

2.2 Heute verfügbare Biokraftstoffe

2.2.1 Biodiesel/Pflanzenöle

Unter Biodiesel versteht man im Allgemeinen Fettsäuremethylester (Fatty Acid Methyl Ester, FAME). Er kann entweder in reiner Form verwendet oder dem konventionellen Dieselkraftstoff in einem beliebigen Verhältnis zugemischt werden.

Rohstoffbasis

Grundsätzlich können für die Biodieselherstellung Ölfrüchte wie Raps, Sonnenblumen, Sojabohnen, Jatropha sowie Kokosnuss- und Palmöle verwendet werden. Außerdem können Tierfette und Altspeisefette als Rohstoffbasis dienen; aufgrund der geringen verfügbaren Menge bleibt dieser Herstellungspfad jedoch eine Nische.

Der Anbau von Ölfrüchten ist nicht in allen geografischen Regionen gleich gut möglich. Im europäischen Raum haben sich aufgrund der Anbaubedingungen Raps (Rapsmethylester, RME) und Sonnenblumen (Sonnenblumenmethylester, SME) durchgesetzt. In Deutschland sind die klimatischen Bedingungen relativ günstig für den Anbau von Raps, was zur Folge hat, dass in Deutschland Biodiesel hauptsächlich aus Raps hergestellt wird.

Intensive Produktionssysteme führen zu Erträgen von etwa 4 t Rapskörnern/ha pro Jahr (IFEU 2004a). Dies entspricht in etwa 1 700 l RME. Der gesamte Biodieselabsatz in Deutschland betrug im Jahr 2005 etwa 2 Mio. t (Abbildung 9). Etwa 40 Prozent dieser Menge wurde dem konventionellen Dieselkraftstoff als 5 Prozent Beimischung zugesetzt (sog. B5), 45 Prozent wurde von Speditionen abgenommen, 10 Prozent als Reinkraftstoff an Tankstellen abgegeben und 5 Prozent in der Landwirtschaft verbraucht (Evers 2005).

Auch reines naturbelassenes (d. h. unverestertes) Pflanzenöl kann als Kraftstoff verwendet werden, hierfür ist aber eine Umrüstung der Motoren erforderlich. In der Regel erlischt dabei die Herstellergarantie. Einige Umrüstkonzepte befinden sich derzeit in der Erprobung. Nicht

[8] Das ist das System, mit dem die Biomasseproduktion zur Kraftstoffbereitstellung verglichen wird, d. h. der Fall, wenn kein Biomasseanbau erfolgt.

für alle Motorensysteme ist die Umrüstung problemlos machbar.[9] Derzeit ist es noch nicht absehbar ob und wann Fahrzeughersteller pflanzenöltaugliche Fahrzeuge/Maschinen serienmäßig anbieten werden.[10]

Eine gewisse Bedeutung besitzt Pflanzenöl als Kraftstoff von land- und forstwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen. Da es biologisch abbaubar und nicht wassergefährdend[11] ist, stellt sich der Einsatz z. B. in Wasserschutzgebieten vorteilhaft dar. Nicht unproblematisch ist es aber, bei diesem Naturprodukt eine gleichbleibende, hohe Kraftstoffqualität zu garantieren.[12] Ein Nachteil ist auch die eingeschränkte Lagerfähigkeit von max. ca. einem Jahr unter optimalen Lagerbedingungen (TFZ 2006).

In der WtW-Betrachtung schneidet Rapsöl bezüglich Energieeinsatz und Treibhausgasemissionen insgesamt schlechter ab als RME (Reinhardt 2003), da Letzteres eine Gutschrift für das bei der Veresterung anfallende Glyzerin erhält. Aus diesen Gründen wird reines Pflanzenöl im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Verfahren zur Biodieselherstellung

Öle und Fette können über die physikalisch-chemischen Verfahren Pressung und Extraktion aus Ölsaaten gewonnen werden. Die hierfür notwendigen Prozesse sind Stand der Technik. Zur RME-Gewinnung werden die gereinigten Öle

9 Im sog. 100-Traktoren-Programm des BMVEL absolvierten nur 63 der 107 Traktoren die Projektlaufzeit ohne oder nur mit geringen Störungen (Hassel/Wichmann 2005).

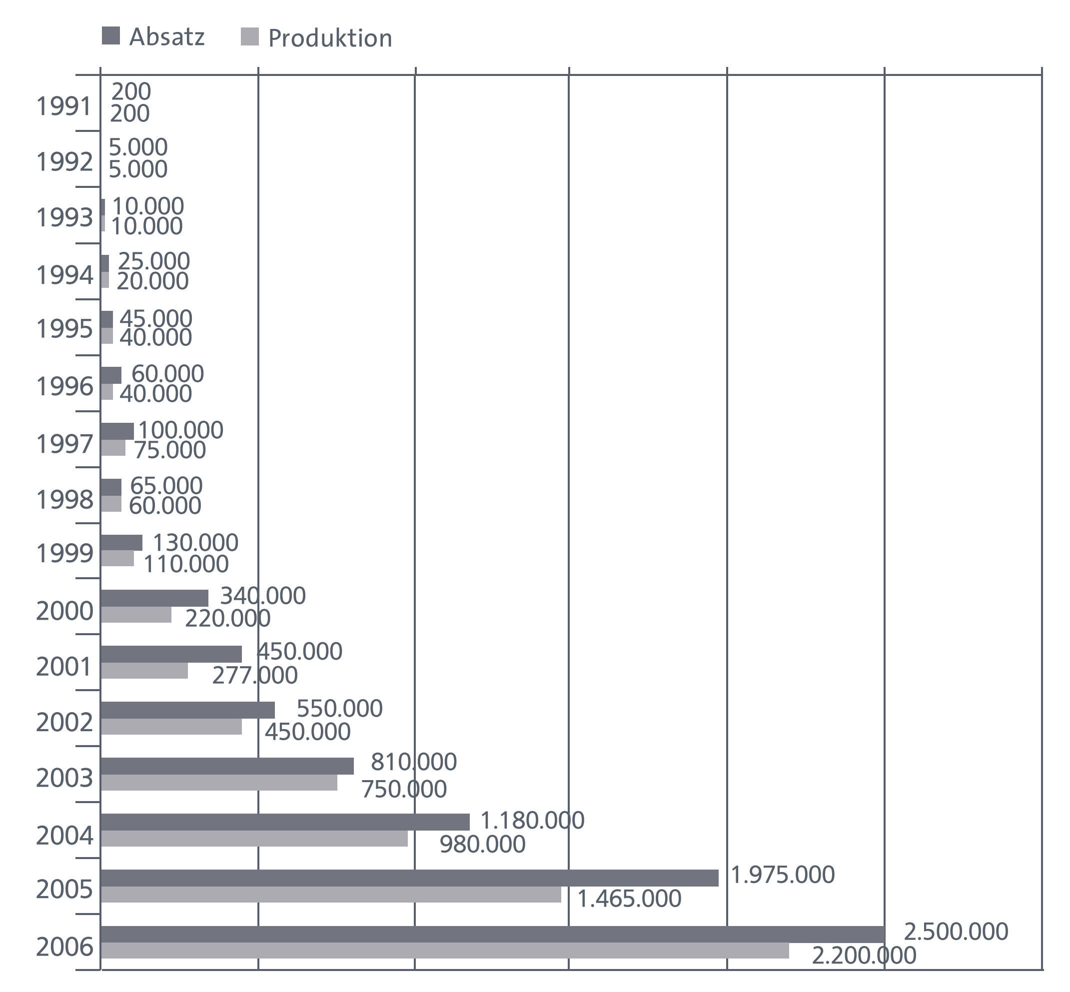
10 Derzeit läuft ein Forschungsvorhaben des Traktorherstellers John Deere, bei dem die werksseitige Ausstattung zum Betrieb mit reinem Pflanzenöl untersucht wird (Solarthemen 2006).

11 Rapsöl ist gemäß der Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe (VwVwS) als „nicht wassergefährdend" eingestuft. Allerdings kann bereits der Zusatz von Additiven oder die Vermischung mit geringen Mengen anderer Kraftstoffe zu einer Einordnung in eine Wassergefährdungsklasse führen.

12 Für Rapsölkraftstoff gibt es derzeit den Entwurf einer Vornorm (DIN 51605).

A b b i l d u n g 9

Absatz und Produktion von Biodiesel in Deutschland



Quelle: Evers 2005

in einem weiteren Verfahrensschritt mit aus Erdgas hergestelltem Methanol verestert. Das Endprodukt kommt in seinen wesentlichen Eigenschaften konventionellem Dieselkraftstoff sehr nahe. Zur Veresterung kann statt Methanol fossilen Ursprungs auch biomassestämmiges Methanol verwendet werden, was die Treibhausgasbilanz deutlich verbessert, aber die Ausbeute senkt und die Kosten erhöht.

Entlang der Produktionskette von RME entstehen hauptsächlich die Koppelprodukte Extraktionsschrot und Glyzerin. Glyzerin fällt bei diesem Prozess mit hoher Reinheit an und kann z. B. als Grundstoff in der pharmazeutischen Industrie eingesetzt werden. Jedoch ist der Absatzmarkt für Glyzerin in solch hoher Reinheit relativ klein.[13] Alternativ kann Glyzerin als Futtermittel verwendet werden. Die daraus resultierende Energie- und THG-Gutschrift in der Ökobilanz ist jedoch deutlich geringer. Das Extraktionsschrot kann als proteinhaltiges Futtermittel verwendet werden und mit einer entsprechenden Gutschrift in die Ökobilanz eingehen. Alternativ kann Rapsschrot auch für die Biogasgewinnung eingesetzt werden.

Die Technologien zur Herstellung von Biodiesel sind praktisch ausgereift. Optimierungspotenziale zeigen sich vor allem beim landwirtschaftlichen Anbau und bei der Nutzung der Koppelprodukte.

Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Tabelle 21 gibt einen Überblick über die Ökobilanz der RME-Kraftstoffvorkette hinsichtlich des fossilen Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen. Die Spannbreite der ermittelten Werte ist vor allem auf die Annahmen zum Düngemitteleinsatz und die Gutschriften für die Koppelprodukte zurückzuführen. Der Energiebedarf ist negativ, wenn ein Energieüberschuss auf der Basis erneuerbarer Energien erzeugt wird. Dass die Treibhausgasemissionen nicht direkt damit korrelieren, liegt am Düngemitteleinsatz, durch den wiederum Treibhausgasemissionen (hier insbesondere auch N_2O) erzeugt werden.

Weitere Umweltauswirkungen

Bei den Parametern Nährstoffeintrag, Versauerung und Ozonabbau hat Biodiesel nach IFEU (2003a) deutliche Nachteile gegenüber fossilem Dieselkraftstoff. Begründet ist dies durch die mit dem landwirtschaftlichen Anbau verbundenen Belastungen der Grund- und Oberflächengewässer mit Bioziden und deren Abbauprodukten sowie Nitraten und Phosphaten. Bei Photosmog zeigt sich nach IFEU (2004a) kein eindeutiges Ergebnis.

Nach GEMIS 4.3 ergibt sich das in Tabelle 22 ausgewiesene Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial für RME. Als Vergleich sind die entsprechenden Indikatoren zusätzlich für fossilen Dieselkraftstoff angegeben. Deutlich wird, dass bei der Berücksichtigung des Koppelprodukts Glycerin RME gegenüber dem fossilen Dieselkraftstoff Vorteile bei dem Ozonbildungspotenzial aufweisen kann, bezüglich des Versauerungspotenzials jedoch tendenziell nachteilig bleibt.

Kosten

Die Angaben für die Herstellungskosten von Biodiesel in der gesichteten Literatur bewegen sich in einer Spanne von etwa 10 bis 22 Euro/GJ. Konventionelle fossile Kraftstoffe liegen im Vergleich dazu bei etwa 5,8 bis 8,1 Euro/GJ. Nach IEA (2005) hängen die Produktionskosten für RME ausschlaggebend von den Rohstoffen ab, aber auch die Größe der Anlage hat einen Einfluss auf die Kosten. So werden die Biodieselkraftstoffkosten für

[13] In den letzten Jahren ist der Marktpreis von hochreinem Glyzerin aufgrund des stark steigenden Angebots bereits drastisch gefallen (MTP 2005).

Tabelle 21

Biodiesel: fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$
CONCAWE 2003	RME (Glyzerin als pharmazeutisches Produkt)	0,39	48,9 (28,2–68,9)
	RME (Glyzerin als Futtermittel)	0,44	53,9 (32,9–73,3)
IFEU 2004a	RME	(- 0,17)– 0,5	13,4–73,4
GEMIS 4.3	RME brutto (ohne Gutschriften)	0,52	65,7
	RME (Glyzerin als pharmazeutisches Produkt)	(- 0,12)	18,2
	RME-öko brutto (ohne Gutschriften)	0,44	29,4
	RME-öko (Glyzerin als pharmazeutisches Produkt)	(- 0,20)	(- 18,1)

öko: aus ökologischem Anbau
Quelle: Öko-Institut 2005a

Tabelle 22

Biodiesel: Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial

	TOPP-Äquivalent in g/MJ_{out}	SO_2-Äquivalent in g/MJ_{out}
Diesel 2010	0,07	0,09
RME brutto (ohne Gutschriften)	0,18	0,42
RME (Glyzerin als pharmazeutisches Produkt)	(- 0,03)	0,22
RME-öko brutto (ohne Gutschriften)	0,19	0,14
RME-öko (Glyzerin als pharmazeutisches Produkt)	(- 0,02)	- 0,06

Quelle: Öko-Institut 2005a

kleine Anlagen mit 0,5 bis 0,8 US-Dollar/$l_{Dieseläquiv}$ (13,94 bis 22,31 US-Dollar/GJ) angegeben und für große Anlagen mit 0,35 bis 0,65 US-Dollar/$l_{Dieseläquiv}$ (9,76–18,13 US-Dollar/GJ). Die geschätzten Kosten schließen die Gutschriften für die Koppelprodukte mit ein. Die Kosten könnten deutlich geringer sein, wenn der Biodiesel aus Altfetten oder Tierfetten hergestellt werden würde, aber diese Abfallrohstoffe sind mengenmäßig stark begrenzt.

Fazit

In Deutschland wird Biodiesel hauptsächlich auf Basis von Raps hergestellt und bereits in erheblichen Mengen dem Dieselkraftstoff beigemischt bzw. in seiner reinen Form verwendet. Die Technologien zur Herstellung von RME sind nahezu ausgereift. Optimierungspotenziale bieten vor allem noch die Reduzierung des Düngemitteleinsatzes, die Ertragssteigerung je Hektar und die Verwertung der Koppelprodukte. Die Energie- und Treibhausgasbilanzen variieren in der Literatur vor allem aufgrund der Annahmen zur landwirtschaftlichen Produktion und der Berücksichtigung der anfallenden Koppelprodukte.

2.2.2 Bioethanol aus zucker- und stärkehaltigen Rohstoffen (klassische Erzeugung)

Ethanol wird durch einen alkoholischen Gärungsprozess aus in Pflanzen enthaltener Stärke bzw. Zucker hergestellt.[14] In Europa wird Ethanol hauptsächlich aus Getreide und Zuckerrüben hergestellt, wohingegen z. B. in Brasilien Zuckerrohr und in den USA Mais als Rohstoff dienen.

Rohstoffbasis

Kurz- und mittelfristig sind Zuckerrüben sowie die verschiedenen Getreidearten die am besten geeigneten landwirtschaftlichen Rohstoffe für die Ethanolerzeugung in Deutschland. Die verschiedenen Rohstoffe weisen jeweils ihre Vor- und Nachteile in der Kraftstoffvorkette auf. Beispielsweise ist die Lagerfähigkeit der Zuckerrübe stark eingeschränkt, kann aber zu Dicksaft verarbeitet das ganze Jahr über verfügbar gemacht werden. Zuckerrüben stellen relativ hohe Anforderungen an die Böden, wodurch der Anbau regional begrenzt ist; dafür ist aber die Konversion kostengünstig. Zurzeit werden etwa 450 000 ha für den Zuckerrübenanbau genutzt, wobei der durchschnittliche Rübenertrag bei etwa 62 t/ha liegt (Schmitz 2005).

Der Getreideanbau zur Ethanolerzeugung zielt vor allem auf einen möglichst hohen Stärkegehalt ab. Weizen, Triticale und Roggen sind gut für die Erzeugung von Ethanol geeignet, führen aber im Vergleich zu Zuckerrüben zu einem geringeren flächenbezogenen Ertrag. Weizen weist einen hohen Stärkegehalt und eine gute Kornausbildung auf, kann gut gelagert werden und erzeugt hochwertige Koppelprodukte. Er ist allerdings ein teurer Rohstoff, der zudem hohe Ansprüche an die Böden stellt. Dagegen können die Getreidesorten Roggen und Triticale auch auf schwachen Böden angebaut werden und haben geringere Ansprüche an Pflege und Düngung. Diese Sorten erreichen jedoch im Vergleich zu Weizen eine deutlich geringere Flächenproduktivität und die Kosten für die Verarbeitung zu Ethanol sind im Vergleich zu Weizen als Rohstoff teilweise höher. In Deutschland wird auf einer Anbaufläche von etwa 7 Mio. ha Getreide kultiviert. Die Erträge liegen je nach Getreidesorte bei 4,9 bis 7,3 t/ha (Schmitz 2005). IFEU (2004a) gibt für die Erträge von Weizen 6,8 bis 9,0 t/ha an. CONCAWE (2003) legt eine Steigerung der Erträge von 1 Prozent pro Jahr aufgrund von genetischen und technischen Verbesserungen im Anbau zugrunde.

Die Herstellung von Ethanol auf Maisbasis, wie in den USA weitverbreitet, spielt in Deutschland bislang keine Rolle. Traditionell eine große Bedeutung für die Ethanolerzeugung hat in Deutschland die Kartoffel. Durch die Nachteile bezüglich der hohen Rohstoff-, Lager- und Verarbeitungskosten, der eingeschränkten Verwendbarkeit der Reststoffe (Schlempe) sowie des hohen Abwasseranfalls spielt dieser Rohstoff perspektivisch jedoch keine bedeutende Rolle.

14 Bei der Herstellung von Ethanol aus Lignozellulose handelt es sich um ein noch nicht voll entwickeltes technisches Verfahren. Es wird in Kapitel V.2.3.2 eingehender behandelt.

Konventionelle Verfahren zur Ethanolherstellung

Bei dem konventionellen Verfahren auf Basis der zucker- und stärkehaltigen Ausgangsstoffe werden Kohlenhydrate mithilfe von Mikroorganismen gespalten und über mehrere Zwischenprodukte zu Ethanol umgewandelt. Die dafür notwendigen Verfahren sind Stand der Technik.

Bei Getreide muss zunächst über Nass- oder Trockenvermahlung das Stärkekorn freigelegt werden, dann erfolgt die Verflüssigung mit heißem Dampf und einem Verflüssigungsenzym. Für die Verzuckerung der Getreidemaische ist ein weiteres Enzym notwendig. Anschließend wird der so aus den Getreidekörnern beziehungsweise aus dem Saft der Zuckerrüben gewonnene Zucker (hauptsächlich Glucose) mit der Hefe im Fermenter vergoren. Dann wird er zu Rohethanol (etwa 45 Prozent Vol.) destilliert und über Rektifikation das nahezu reine Ethanol (etwa 96 Prozent Vol.) hergestellt. Wenn Ethanol als Zusatz zu Ottokraftstoff eingesetzt werden soll, muss es absolut wasserfrei sein. Hierfür hat sich in den letzten Jahren das Molekularsiebverfahren weitgehend durchgesetzt. Im Jahr 2003 wurden in Deutschland etwa 280 000 m^3 Ethanol erzeugt. Im Jahr 2005 waren weitere Großanlagen mit einer Gesamtkapazität von 540 000 m^3 geplant (Schmitz 2005).

Die bei der Ethanolherstellung aus Getreide anfallende Schlempe verursacht in Großbrennereien wesentliche Kosten. Etwa 45 Prozent der Investitionskosten entfallen auf die Anlagen für die Aufarbeitung der Getreideschlempe (Schmitz 2005). Je Liter hergestelltem Ethanol fallen etwa 10 l Schlempe an. Diese kann eingedampft werden und in Form von DDGS („destiller‘s dried grain and solubles“) als hochwertiges proteinhaltiges Futtermittel oder als Brennstoff dienen. Auch kann die Dünnschlempe zusammen mit dem Co-Substrat zur Biogaserzeugung genutzt werden, und auf diese Weise zur Energieversorgung der Brennerei beitragen. Das verbleibende („ausgefaulte“) Material kann als Dünger eingesetzt werden (Bockey 2003). Bei der Verwendung von Zuckerrüben als Ausgangsrohstoff entstehen als Koppelprodukte Rübenschnitzel und Vinasse (entzukkerte Melasse), die beispielsweise zur Energiegewinnung bzw. als Dünger verwertet werden können.

Die Technologien zur Herstellung von Ethanol auf konventionellem Wege sind nahezu ausgereift. Optimierungspotenziale zeigen sich vor allem bei der Herstellung und Nutzung der Koppelprodukte und beim landwirtschaftlichen Anbau. Eine unmittelbare und wesentliche Optimierung des Energieeinsatzes und der Treibhausgasemissionen bei der Landwirtschaft ist vor allem durch die Reduzierung des Düngemitteleinsatzes möglich. Weitere Ansatzpunkte sind die Verwertung von Koppelprodukten, Effizienzerhöhung des Maschineneinsatzes sowie eine Ertrags- und Qualitätssteigerung. Saatgutzüchter gehen davon aus, dass der Ertrag an Ethanol je ha Getreide um bis zu 10 Prozent durch geeignetes Saatgut gesteigert werden kann (Schmitz 2005).

Beispiel Brasilien

Das weltweit größte Ethanolprogramm ist das Programm „Proalcool“, das 1975 in Brasilien ins Leben gerufen wurde. Die gängigen Kraftstofftypen sind Gasohol E25 (besteht aus 75 Prozent Benzin und 25 Prozent Ethanol) und reines Ethanol E100. Über 50 Prozent der Neuzulassungen in Brasilien sind mittlerweile Flexible Fuel Vehicles (FFV), die mit Benzin und Ethanol in jedem Mischungsverhältnis fahren können. Wegen den Anbaubedingungen von Zuckerrohr und der technologischen Entwicklung ist Ethanol in Brasilien nur halb so teuer wie in Europa. Das Produktionsvolumen ist jedoch stark von der Entwicklung des globalen Zuckermarktes und von Wettereinflüssen abhängig (Schmitz 2005).

Die Energiebilanz von Ethanol aus Zuckerrohr fällt insgesamt deutlich positiver aus als in Europa, was daran liegt, dass einerseits der Ertrag von Zuckerrohr in Brasilien sehr hoch ist und andererseits dort bei der Ethanolerzeugung die anfallende Bagasse für die Deckung des Prozessenergiebedarfs genutzt werden kann. Prinzipiell kann in allen Anlagen mit Stromüberschuss produziert werden. Eine weitere Verbesserung ist möglich, wenn der Energiegehalt des Strohs mitgenutzt wird.

Macedo et al. (2003) haben für die Produktion von Ethanol in Brasilien zwei Szenarien berechnet: den derzeitigen durchschnittlichen Stand der Technik und das technisch realisierbare Optimum jeweils mit Gutschriften für die Bagasse, sodass kein externer Energieinput erforderlich ist. Der Energiebedarf pro Megajoule Ethanol wird für das Szenario 1 mit 0,12 MJ_{input}/MJ_{output} Kraftstoff, für das optimierte Szenario 2 mit nur 0,098 MJ_{input}/MJ_{output} angegeben. Durch das in Szenario 1 und 2 erzeugte Ethanol werden im Vergleich mit Ottokraftstoff 2,6 kg/l, bzw. 2,7 kg/l Treibhausgasemissionen (berechnet als CO_2-Äquivalente) vermieden.

Einsatzmöglichkeiten von Ethanol

Bioethanol weist von allen Biokraftstoffen weltweit die größte Verbreitung auf, was vor allem auf die hohen Produktionsmengen in Brasilien und den USA zurückzuführen ist. In Deutschland ist die Einsatzmöglichkeit aufgrund der derzeit gültigen Kraftstoffnorm stark eingeschränkt. Danach darf dem Ottokraftstoff lediglich bis zu 5 Prozent Vol. Ethanol beigemischt werden (E5). Prinzipiell – mit leichten Modifikationen der Motorentechnik – kann Ethanol jedoch in jedem Mischungsverhältnis dem Ottokraftstoff zugesetzt und auch in seiner Reinform genutzt werden. Seit kurzer Zeit sind auch auf dem deutschen Markt sogenannte Flexible Fuel Vehicles (FFV) erhältlich, deren Motorsteuerung sich durch eine Echtzeitmessung der Kraftstoffdichte im Tank auf den jeweiligen Ethanolgehalt einstellt. Sie können daher mit jedem beliebigen Mischungsverhältnis von Ethanol und Ottokraftstoff betrieben werden und auch mit reinem Ethanol fahren.

Ein Diskussionspunkt bezüglich der Beimischung von Ethanol zum Ottokraftstoff ist in Deutschland zurzeit die sog. Dampfdruckanomalie des Gemisches. Prinzipiell weist Ethanol einen niedrigeren Dampfdruck als Ottokraftstoff auf, sodass bei Zumischung der Dampfdruck des Gemisches abfallen sollte. Dies ist bei niedrigen Ethanolkonzentrationen jedoch nicht der Fall. Bei der Sommerware mit 5 Prozent Ethanolbeimischung erhöht sich der Dampfdruck des Kraftstoffs über die per Kraftstoffnorm zulässigen 60 kPa. Zudem besteht die Möglichkeit, dass reiner Ottokraftstoff zu E5 hinzugetankt werden kann und dadurch der Dampfdruck aufgrund der Anomalie noch weiter ansteigt. Das bedeutet, dass die Grundware so modifiziert werden muss, dass sie zunächst einen deutlich niedrigeren Dampfdruck aufweist. Technisch ist dieses Problem zu lösen, wird derzeit jedoch wegen der entstehenden zusätzlichen Kosten breit diskutiert (Jaschinski 2005).

Alternativ kann aus Ethanol und Isobuten das Antiklopfmittel ETBE (Ethyltertiärbutylether) hergestellt werden. Derzeit wird hierzu MTBE (Methyltertiärbutylether) mit 2 bis 3 Prozent dem Ottokraftstoff beigemischt. ETBE ist nach gültiger Norm bis zu 15 Prozent beimischbar. Jedoch ist nicht damit zu rechnen, dass ETBE in diesem hohen Maße eingesetzt wird, da dies technisch nicht notwendig ist und gleichzeitig höhere Kosten verursachen würde. Im Vergleich zur direkten Beimischung von Ethanol hat ETBE den Vorteil, dass es aus technischer Sicht unproblematisch ist. ETBE besteht aus 47 Prozent Vol. Ethanol. Der Energieaufwand zur Bereitstellung von ETBE wird vor allem durch den fossilen Anteil (d. h. das Isobuten) bestimmt.

Eine weitere Möglichkeit, die in Deutschland zurzeit weniger intensiv diskutiert wird, besteht darin Ethanol mit Dieselkraftstoff zu mischen. Da diese beiden Stoffe nicht direkt mischbar sind, sondern eine Emulsion bilden, benötigt man hierfür Hilfsstoffe (Emulgatoren), die sicherstellen, dass keine Entmischungseffekte auftreten. Seit den 1990er Jahren gab es einige Feldversuche u. a. in den USA, Schweden und Brasilien, sowohl mit Dieselkraftstoffen mit geringer Ethanolbeimischung (z. B. weniger als 8 Prozent), als auch umgekehrt Ethanol mit geringer Dieselbeimischung (z. B. 95 Prozent zu 5 Prozent). Obwohl diese Versuche relativ erfolgreich waren, erfordert diese Option weitere Forschung bei der Entwicklung von Emulgatoren, die in den verschiedenen Klimazonen effektiv sind (IEA 2004, S. 106 ff.).

Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Tabelle 23 zeigt die Spannen bei den Angaben, die hinsichtlich des fossilen Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen in der Vorkette von Bioethanol in der Literatur zu finden sind. Die Unterschiede ergeben sich aus den Annahmen zum landwirtschaftlichen Anbausystem, sowie zum Umgang mit den Koppelprodukten. Weiterhin ist auch die verwendete Quelle der Primärenergie für das Ergebnis mitbestimmend. So macht es einen erheblichen Unterschied, ob man z. B. Braunkohle als Prozessenergie einsetzt oder aber biogene Energieträger.

Die Kapazität der Anlagen oder die Prozesstechnik haben dagegen einen relativ geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Die geringsten Umweltauswirkungen bezüglich Primärenergieaufwand und Treibhausgasemissionen haben Verfahren, bei denen

– nach der Stärkevergärung die Schlempe nach Zugabe von Raps weitervergärt wird, was bedeutet, dass die Prozessenergie regenerativ erzeugt werden kann,
– aus der Dünnphase Biogas zur Energiebereitstellung generiert wird oder aber
– die Abfallverbrennung die benötigte Energie bereitstellt. Dies stellt jedoch einen Sonderfall dar, da die Menge des Abfalls schwer vorauszusagen ist und in Konkurrenz mit einer Vielzahl von Energieversorgungskonzepten steht.

Eine Aussage wie „Weizen hat eine bessere/schlechtere Treibhausgasbilanz als Zuckerrüben“ lässt sich aus dem vorhandenen Datenmaterial nicht ableiten.

Tabelle 23

Bioethanol (konventionell hergestellt): fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	**Kraftstoffpfad**	**fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}**	**THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$**
CONCAWE 2003	Zuckerrübe (Nebenprodukt als Futtermittel)	0,92	51 (47,9–53,9)
	Zuckerrübe (Nebenprodukt zur Erzeugung von Biogas und damit Bereitstellung der Prozessenergie)	0,30	28,3 (26,2–30,5)
	Weizen (Nebenprodukt als Futtermittel)	1,00	74,1 (49,7–92,1)
IFEU 2004a	Zuckerrübe	0,03–0,89	7,7–57,7
	Weizen	0,39–1,04	28–77
Schmitz 2005	Rübensaft (Prozessenergie Braun-		75,5
	kohle, Koks)	0,69	51,9
	Getreide (Prozessenergie Erdgas)	0,70	18,9
	Getreide optimiert (Dünnphasevergärung, Biogasnutzung mit Energieüberschuss)	0,094	
GEMIS 4.3	Weizen 2010	0,42	48,8
	Weizen-öko 2010	0,38	29,9
	Zuckerrübe 2010, brutto	0,59	57,7
	Zuckerrübe 2010, Gutschrift Überschussstrom über Kraftwerkspark	0,50	51,9

öko: aus ökologischem Anbau
Quelle: Öko-Institut 2005a

Weitere Umweltauswirkungen

Für die Parameter Versauerung und Eutrophierung ergeben sich Nachteile für die Herstellung von Bioethanol im Vergleich mit fossilem Ottokraftstoff. Ähnlich sieht es bei den für den Ozonabbau relevanten Emissionen von Lachgas aus (GEMIS 4.3; IFEU 2004a). Die landwirtschaftliche Produktionsweise bestimmt diese Ergebnisse maßgeblich. Tabelle 24 führt die Daten aus GEMIS 4.3 für das Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial für Bioethanol auf. Als Vergleich sind die entsprechenden Indikatoren für fossilen Ottokraftstoff angegeben.

Tabelle 24

Bioethanol (konventionell hergestellt): Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial

	TOPP-Äquivalent in g/MJ_{out}	**SO_2-Äquivalent in g/MJ_{out}**
Ottokraftstoff 2010	0,21	0,10
Weizen 2010	0,27	0,34
Weizen-öko 2010	0,28	0,20
Zuckerrübe 2010, brutto	0,31	0,40
Zuckerrübe 2010, Gutschrift Überschussstrom über Kraftwerkspark	0,30	0,39

Quelle: Öko-Institut 2005, Daten aus GEMIS 4.3

Kosten

Die Angaben für die Herstellungskosten von Ethanol in der gesichteten Literatur (IEA 2005; IFEU 2004a; Öko-Institut 2004b; VIEWLS 2005; Wagner/Igelspacher 2003) bewegen sich bei Weizen als Ausgangsstoff zwischen 11 und 55 Euro/GJ und liegen bei Zuckerrüben bei 17 bis 60 Euro/GJ. Zum Vergleich: Konventionelle fossile Kraftstoffe liegen bei Kosten von etwa 5,8 bis 8,1 Euro/GJ. Tendenziell lässt sich in größeren Anlagen preisgünstiger produzieren, kleinere Anlagen lassen sich einfacher energieoptimiert auslegen. Teilweise werden in die Kostenbetrachtungen Flächenstilllegungsprämien mit einberechnet.

Fazit

In Deutschland wird konventionelles Bioethanol auf Basis von Zuckerrüben und Getreide, hier vor allem Weizen, hergestellt. Es kann dem Ottokraftstoff gemäß der geltenden Kraftstoffnorm prinzipiell mit 5 Prozent Vol. beigemischt werden. Dies wird derzeit in Deutschland jedoch aufgrund der „Dampfdruckproblematik“ noch nicht praktiziert. Auch für konventionelles Bioethanol sind die Technologien zur Herstellung nahezu ausgereift. Optimierungspotenziale bieten vor allem noch die Reduzierung des Düngemitteleinsatzes, die Ertragssteigerung je Hektar und die Verwertung der Koppelprodukte. Die Energie- und Treibhausgasbilanzen variieren in der Literatur sehr stark vor allem aufgrund der unterschiedlichen Annahmen zur landwirtschaftlichen Produktion und der Berücksichtigung der anfallenden Koppelprodukte. Durch diese starke Varianz vor allem bezüglich der Nutzung der Koppelprodukte zur Energieerzeugung lässt sich kein eindeutiger Trend für oder gegen Zuckerrüben und Weizen als Rohstoff erkennen. Die THG- und Energiebilanzen für Bioethanol aus Brasilien (zuckerrohrbasiert) sind demgegenüber eindeutig günstiger, ebenso die Kosten (ca. Faktor 2 gegenüber Deutschland).

2.2.3 Biogas

Biogas, auch als SNG (Substitute Natural Gas) bezeichnet, kann mit ähnlichen Spezifikationen wie Erdgas hergestellt werden, sodass es in Erdgasmotoren direkt oder in beliebigen Beimischungsverhältnissen eingesetzt und die bestehende Infrastruktur für Erdgas genutzt werden kann.

Rohstoffbasis

Als Rohstoffe zur Biogasgewinnung eignen sich vor allem biologische Reststoffe wie Gülle, organische Abfälle sowie Energiepflanzen (Anbaubiomasse) wie Mais und Feuchtgut.

Verfahren zur Biogasgewinnung

Die Herstellung von Biogas erfolgt durch anaerobe Fermentation (Vergärung von Biomasse). Üblich sind heute „nasse“ ein- oder zweistufige Verfahren, die flüssige Substrate als Ausgangsbasis nutzen, während die Trockenfermentation (z. B. von Festmist) noch in der Entwicklung ist. Unter der anaeroben Vergärung von Gülle, Bioabfall, Gras oder anderen organischen Substraten versteht man den biologischen Abbau unter Ausschluss von Sauerstoff. Hierbei werden die organischen Verbindungen mittels einer heterogenen Bakterienpopulation in einem feuchten und warmen Milieu zerlegt, wobei ein Gasgemisch entsteht, das zu etwa zwei Dritteln aus Methan (CH_4) und einem Drittel aus CO_2 besteht. Biogas muss, bevor es als Kraftstoff genutzt werden kann, gereinigt und in seine Bestandteile zerlegt werden, was in der Regel über zwei Stufen erfolgt: einer CO_2-Abscheidung und einer anschließenden Gasreinigung (Mozzafarian/Zwart 2003). Das Produkt kann dann als methanreiches Gas ins Erdgasnetz eingespeist werden.[15] Alternativ ist es auch möglich, das Gas in Druckflaschen abzufüllen und so zu den Abnehmern/Tankstellen zu transportieren. Dies wird vor allem in Ländern ohne ausgebaute Erdgasinfrastruktur praktiziert (z. B. in Schweden).

Bei der Vergärung handelt es sich um einen bereits kommerziell genutzten Prozess, der vor allem zur dezentralen Energieerzeugung in kleinem Maßstab und im Bereich der Abwasserreinigung zur Behandlung der Klärschlämme eingesetzt wird. In Deutschland sind etwa 2 500 Biogasanlagen in Betrieb (Siegmund 2006), die bisher jedoch vorrangig Gas zur Verstromung und KWK erzeugen (Rudloff 2005). Zu beachten ist, dass mit steigender Anlagengröße der spezifische Aufbereitungsaufwand sinkt, aber damit einhergehend der Transportaufwand der Biomasse ansteigt. Da vorwiegend organische Materialien mit einem hohen Feuchtgehalt eingesetzt werden und diese ein sehr ungünstiges Verhältnis von Gewicht zu Energiegehalt aufweisen, werden weitere Transportwege schnell unwirtschaftlich.

Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Der Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen variieren je nach Ausgangsstoff beträchtlich. Bei der Fermentation von Gülle und Bioabfällen kann das ausgegorene Substrat als Dünger verwendet werden. Die Bilanz sollte daher entsprechende Gutschriften enthalten. Tabelle 25 gibt einen Überblick über verschiedene Biogaspfade.

Weitere Umweltauswirkungen

IFEU (2004a) kommt zu dem Ergebnis, dass die Herstellung von Biogas je nach eingesetztem Rohstoff bezüglich der weiteren Umweltauswirkungen durchaus Vorteile gegenüber fossilem Kraftstoff haben kann. Das Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial für Biogas nach GEMIS 4.3 zeigt Tabelle 26. Zum Vergleich sind die entsprechenden Indikatoren für Erdgas angegeben, die gegenüber den fossilen Otto- und Dieselkraftstoffen aufgrund des fehlenden Raffinerieprozesses deutlich geringere Werte aufweisen.

---

[15] Wird das Biogas ins Gasnetz eingespeist, ist es nicht trivial, die eingespeiste Menge den entsprechenden Verbrauchern zuzuordnen. Für eine korrekte Allokation müsste daher ein Tracking- und Zertifizierungssystem aufgebaut werden (z. B. von den Netzbetreibern).

Tabelle 25

Biogas (Vergärung): fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$
IFEU 2004a	Biogas aus Reststoffen	0–0,69	(- 52)– 38
GEMIS 4.3	Biogas aus Gülle (2010)	0,21	16,0
	Biogas aus org. Hausmüll (2010)	0,06	5,3
	Biogas aus Zoomasse (2010)	0,33	21,1
	Biogas aus Mais (2010)	0,20	21,2
	Biogas aus Mais-öko (2010)	0,21	16,8
	Biogas aus Feuchtgut (2010)	0,18	21,7

Quelle: Öko-Institut 2005a

Tabelle 26

Biogas: Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial

	TOPP-Äquivalent in g/MJ_{out}	SO_2-Äquivalent in g/MJ_{out}
Erdgas 2010	0,05	0,03
Biogas aus Gülle (2010)	0,13	0,08
Biogas aus org. Hausmüll (2010)	0,03	0,03
Biogas aus Zoomasse (2010)	0,07	0,03
Biogas aus Mais (2010)	0,09	0,14
Biogas aus Mais-öko (2010)	0,11	0,08
Biogas aus Feuchtgut (2010)	0,13	0,11

Quelle: Öko-Institut 2005a

Kosten

Die Bandbreite für die Kostenangaben bei Biogas auf der Basis von Reststoffen beträgt in der Literatur etwa 15 bis 34 Euro/GJ (IFEU 2004a). Öko-Institut (2004b) nennt folgende Gestehungskosten von Biogas (in $Euro_{2000}$/GJ) zum Zeithorizont 2010: Biogas aus Gülle 7,8; aus Biomüll 9,0; aus Zoomasse 15,3; aus Mais 19,1; aus Feuchtgut 11,0. Hierzu müssen die Kosten für die Aufbereitung zu Erdgasqualität von rd. 10 bis 20 Euro/GJ (je nach Anlagengröße) addiert werden.

Die Gestehungskosten von Biogas hängen relativ stark von der Anlagengröße ab. In kleineren Anlagen (50 m^3/h) können sie bei 40 bis 50 Euro/GJ liegen, wohingegen große Anlagen (250 m^3/h und größer) sich den heutigen Tankstellenpreisen von fossilem CNG (ca. 16 Euro/GJ) annähern können (WI/IE/FHG/GWI 2005)

Fazit

Biogas kann mit ähnlichen Spezifikationen wie Erdgas hergestellt werden, sodass es in Erdgasmotoren bzw. Brennstoffzellen eingesetzt und die bestehende Infrastruktur für Erdgas genutzt werden kann. Auch hier ist die Verfahrenstechnik ausgereift, da Biogasanlagen bereits in großer Anzahl in Deutschland betrieben werden. Es gibt nur wenige Veröffentlichungen, die die Herstellung von Biogas als Kraftstoff bilanzieren. Je nachdem, ob als Rohstoff Reststoffe oder Anbaubiomasse verwendet wird, können Energie-, Treibhausgas- und Kostenbilanz stark variieren. Bei Anbaubiomasse scheinen 2-Kulturen-Systeme (Feuchtgutlinien) v. a. kostenseitig günstig abzuschneiden. Generell ist die Bilanz für Biogas aus Reststoffen sehr günstig, ebenso sind es die Kosten.

2.3 Biokraftstoffe in der Entwicklungsphase

Neben den im vorangegangenen Kapitel dargestellten erprobten Kraftstoffpfaden befindet sich derzeit aufgrund des gestiegenen Interesses und der besonderen Förderung erneuerbarer Energien eine Vielzahl von Verfahren zur Erzeugung von Biokraftstoffen aus einem breiten Spektrum von Rohstoffen in der Entwicklung. Diese werden oft mit dem Sammelbegriff „Biomass-to-liquid“ (BtL)

charakterisiert. Sie zielen vor allem darauf ab, eine breite Toleranz gegenüber verschiedenen Arten von Biomasse als Rohstoff zu ermöglichen und einen hohen Ertrag zu gewährleisten. Beim Ertrag haben diese Verfahren schon dadurch einen Vorteil gegenüber dem „klassischen“ Biodiesel, dass nicht nur bestimmte Teile der Pflanzen (also z. B. die Rapssaat) verwendet werden, sondern die Nutzung der ganzen Pflanze angestrebt wird.

Insbesondere zwei in der Entwicklung befindliche Verfahren sind mittel- bis langfristig vielversprechend. Das ist zum einen die Herstellung von Synthesegas aus Biomasse, das dann in weiteren Prozessschritten zu verschiedenen Kraftstoffen weiterverarbeitet werden kann (FT-Diesel, Methanol, Dimetylether, SNG und Wasserstoff) und zum anderen die Erzeugung von Bioethanol über den enzymatischen Aufschluss hemi- bzw. lignozellulosehaltiger Materialien (Holz, Stroh) und der anschließenden Vergärung des (Hemi-)Zelluloseanteils.

Die Vergasungs- und Vergärungsketten sind vor allem deswegen Gegenstand aktueller intensiver Forschung und Entwicklung, da diese Kraftstoffpfade einige deutliche Vorteile aufweisen:

– Bei der Auswahl des Rohstoffs ist man nicht auf spezifische Pflanzenarten beschränkt, sondern es steht eine breite Palette an Pflanzen zur Verfügung, die im Prinzip auch miteinander gemischt werden können.

– Mittel- bis langfristig sind lignozellulosehaltige Rohstoffe besonders interessant, da sie zum einen in sehr großen Mengen und zum anderen im Vergleich zu spezifischen Energiepflanzen wahrscheinlich zu deutlich niedrigeren Preisen zur Verfügung stehen werden.

– Die direkte Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion – wie z. B. bei der Herstellung von Ethanol aus Getreide – kann vermieden werden.

– Der Einsatz von fossilen Energieträgern kann weiter vermindert werden, da bei optimierten Anlagen die für den Prozess benötigte Energie komplett auf Biomasse als Energieträger umgestellt werden kann.

– Es können hochwertige Kraftstoffe erzeugt werden, die (in gewissen Grenzen) auf die Anforderungen moderner Motoren hin zugeschnitten werden können. (Man spricht auch von „Designerkraftstoffen“.)

Um die Kosten und auch die Umweltauswirkungen bei diesen Verfahren möglichst gering zu halten, bedarf es unter anderem sehr günstiger Standortbedingungen der Konversionsanlagen (Transportlogistik für die Bereitstellung großer Mengen an Biomasse) oder einer thermochemischen Umwandlung der dezentral anfallenden Brennstoffe.

2.3.1 Kraftstoffe über Synthesegas

Ein Ansatz, eine breite Palette biogener Rohstoffe in gasförmige oder flüssige Kraftstoffe umzuwandeln, ist die direkte Vergasung mit anschließender Konversion des Synthesegases zum gewünschten Kraftstoff (Abbildung 10).

Rohstoffbasis

Halmgutartige Biomassen wie Stroh und Holz bilden ein großes biogenes Rohstoffpotenzial und können als Ausgangsbasis zur Erzeugung von Synthesegas zur Kraftstoffproduktion dienen.

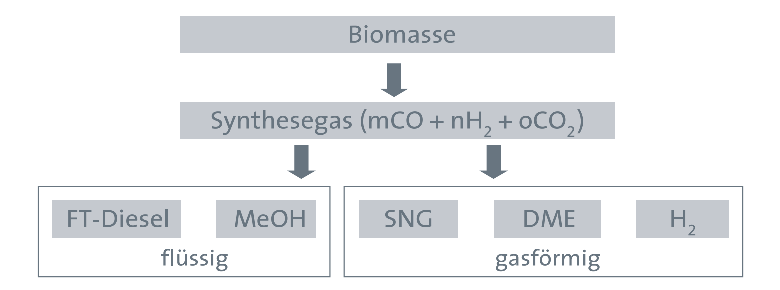
Produkte der Biomassevergasung

Mögliche resultierende Kraftstoffe sind der sogenannte Fischer-Tropsch(FT)-Diesel, Methanol, Dimethylether (DME) als Alternative zu Dieselkraftstoff und gasförmige Kraftstoffe wie Methan oder Wasserstoff. DME und Wasserstoff sind mit den heute herkömmlichen Motorentechnologien nicht kompatibel und benötigen zusätzlich eine neue Infrastruktur zur Distribution. Die möglichen Kraftstoffe werden im Folgenden kurz dargestellt:

– Fischer-Tropsch-Diesel: FT-Diesel hat nahezu die gleichen Eigenschaften wie fossiler Dieselkraftstoff und kann ohne Anpassungen von Infrastruktur oder Antriebssystem in die vorhandenen Systeme integriert werden. Ein weiterer Vorteil von FT-Diesel ist, dass es sich hierbei aufgrund der Verfahrenstechnik um einen hochreinen, aromatenfreien Kraftstoff mit hoher Cetanzahl handelt, der auf die Anforderungen der Motorentechnik gezielt abgestimmt werden kann.

Abbildung 10

Mögliche Produkte bei der direkten Vergasung von Biomasse mit anschließender Konversion des Synthesegases zu Kraftstoffen



Quelle: Öko-Institut 2005a

– Methanol: Wegen der hohen Oktanzahl ist Methanol prinzipiell geeignet, in Ottomotoren eingesetzt zu werden. Bei Temperaturen unter 10 °C ergeben sich jedoch Startprobleme, sodass ohne Motorenanpassung nur eine Beimischung von 15 Prozent möglich ist (Vogel et al. 2004). In Deutschland ist aufgrund der Kraftstoffnorm sogar nur eine Beimischung von 3 Prozent erlaubt. Auch weist Methanol einen recht geringen Energieinhalt auf (etwa die Hälfte von Benzin). Aus diesen Gründen und wegen seiner hohen Toxizität ist Methanol als Kraftstoff nicht uneingeschränkt empfehlenswert.

– Dimethylether: Dimethylether (DME) hat gute Verbrennungs- und Emissionseigenschaften in Dieselmotoren, die aber leicht modifiziert werden müssen. Das Hauptproblem beim Einsatz von DME liegt darin, dass ein Drucktanksystem ins Fahrzeug eingebaut werden muss und eine spezielle Infrastruktur erforderlich ist, da es bei Normaldruck gasförmig ist und daher in den Speicher- und Lagerungssystemen ein Überdruck von 5 bis 10 bar sichergestellt werden muss (Vogel et al. 2004). Nach STEM (2002) und Kolke (2004) weist DME gerade auch bei der WtW-Betrachtung gute Umwelteigenschaften auf.

– SNG: Biogas, auch als SNG (Substitute Natural Gas) bezeichnet, kann mit ähnlichen Spezifikationen wie Erdgas hergestellt werden, sodass es in Erdgasmotoren eingesetzt und die bestehende Infrastruktur für Erdgas genutzt werden kann.

– Wasserstoff: Wenn der Vergasungsprozess entsprechend modifiziert wird, kann der Anteil von Wasserstoff im Synthesgas deutlich erhöht werden. Der Wasserstoff ist prinzipiell direkt als Kraftstoff nutztbar. Die Energie- und Treibhausgasbilanzen werden aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit im Kapitel V.3 diskutiert.

Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen über Synthesegas

Es gibt bei dieser Konversionsroute eine große Anzahl unterschiedlicher Verfahren und Konzepte, die sich zum größten Teil noch in der Entwicklung befinden. Grundsätzlich bestehen die Verfahren aus vier wesentlichen Prozessschritten: der Biomassekonditionierung, der Vergasung, der Gasaufbereitung und der Synthese des gewünschten Kraftstoffs. Sowohl die Entwicklung geeigneter Vergasungsverfahren und der Gasreinigung als auch die Zusammenführung zu funktionierenden Gesamtkonzepten ist noch nicht abgeschlossen.

Vorkonditionierung

Als eine wesentliche Anforderung muss eine wirtschaftlich sinnvolle Logistik für die Verarbeitung dezentral anfallender Biomasse in zentralen Konversionsanlagen erfüllt sein. Ab der Prozessstufe der Biomassevergasung sind betriebswirtschaftlich sinnvolle und technisch beherrschbare Leistungsgrößen von 100 MW und mehr vorzusehen, wobei Kraftstoffsynthese und -konditionierung in Leistungsgrößen von Raffinerien im GW-Bereich anzusiedeln sind (Meyer et al. 2005). Diese Anforderungen müssen mit der dezentralen Biomassebereitstellung zweckmäßig und mit möglichst geringen energetischen Verlusten durch die Zwischenschaltung weiterer Prozesse wie der Herstellung von Pyrolyseölen und dem Transport erfüllt werden.

Wie bei den anderen Konversionspfaden muss die Biomasse zunächst vorbehandelt werden, was in dem Fall der Vergasung vor allem bedeutet, dass sie zerkleinert und getrocknet werden muss. Bestimmte Vergasungsverfahren wie die Flugstromvergasung benötigen flüssige oder pastöse Biomasse als Ausgangsstoffe. Hierfür muss die Biomasse vorab in möglichst hohen Ausbeuten verflüssigt werden, was durch eine Flashpyrolyse realisiert werden kann (Meier 2003).

Synthesegasherstellung und -aufbereitung

Zur Synthesegasherstellung wird die Biomasse in einem Reaktor unter Druck bei Zuführung von Wärmeenergie mit einem Vergasungsmittel, z. B. Sauerstoff, in den gasförmigen Zustand überführt. Das entstehende Gas besteht vor allem aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Als Vergasertypen kommen Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromvergaser infrage. Da die Anforderungen, die an das Synthesegas gestellt werden (v. a. chemische Zusammensetzung und Freiheit von Verunreinigungen), relativ hoch sind, ist nach dem Vergasungsschritt eine Gasaufbereitung erforderlich. Um den Aufwand und damit auch die Kosten hierfür möglichst gering zu halten, ist die Entwicklung fortschrittlicher Vergasungsverfahren eine der Hauptaufgaben der zukünftigen Kraftstoffbereitstellung. Über die Einstellung verschiedener Prozessparameter kann das Synthesegas so optimiert werden, dass es die für die anschließende Verwendung, wie beispielsweise die FT-Synthese, gewünschte Zusammensetzung hat.

In einem anschließenden Verfahrensschritt muss die erforderliche Reinheit des Gases, das in der Regel mit Teeren, Aromaten und anorganischen Komponenten wie Schwefel- und Halogenverbindungen verunreinigt ist, gewährleistet werden. Der technologische Aufwand für die Gasreinigung hängt sehr stark von der verwendeten Biomasse und dem Verfahren zur Vergasung ab. In der Regel werden die klassischen Verfahren zur Grob- und Feinreinigung eingesetzt. Ein höherer Wasserstoffanteil kann durch eine homogene Wassergasreaktion durch CO-Shift mit anschließender H_2-Separierung realisiert werden, ist aber durch den Einsatz des Shiftreaktors mit Mehraufwand verbunden (Vogel et al. 2004).

Kraftstofferzeugung

Anlagen zur Fischer-Tropsch-Synthese auf Basis fossiler Energieträger zur Herstellung von Dieselkraftstoff werden bereits großtechnisch erfolgreich betrieben, wie in Südafrika von Sasol (South African Synthetic Oil Ltd.) oder von Shell in Malaysia. Die dabei verwendeten technischen Lösungen sind allerdings nicht problemlos auf die bei einer Biomassevergasung erreichbaren Leistungen und Anlagen übertragbar. Fischer-Tropsch-Anlagen sind mit hohen Investitionskosten verbunden, was bedeutet, dass

hohe Kraftstoffherstellungskapazitäten erreicht werden müssen, um FT-Diesel im Vergleich mit anderen Kraftstoffen wettbewerbsfähig zu machen (Boerrigter et al. 2004). Für die Herstellung von Dieselkraftstoff wird das Niedertemperaturverfahren verwendet. Hierbei entstehen langkettige Kohlenwasserstoffe, die mittels Hydrocracking durch Wasserstoff, der in einem separaten Synthesegasstrom erzeugt werden kann, zu Diesel umgewandelt werden können. Das Restgas kann zur Maximierung der Ausbeute der Flüssigfraktion dem FT-Prozess wieder zugeführt oder zur Energie- und Wärmeerzeugung genutzt werden. Die Bildung der Endprodukte wird durch verschiedene Einflussfaktoren bestimmt und kann durch die Katalysatorwahl (Kobalt, Eisen) und Synthesebedingungen (Temperatur, Synthesegaszusammensetzung und Druck) eingestellt werden. Beispielsweise ist bei Kupfer-Zink-Katalysatoren die Selektivität für Methanol hoch (Hamelinck/Faaij 2001). Dies kann entweder direkt genutzt oder über Dehydrierung zu DME umgewandelt werden.

Alternativ können die Prozessbedingungen bereits beim Vergasungsverfahren der Biomasse so gewählt werden, dass eine möglichst hohe Ausbeute an SNG erzielt wird, ohne eine anschließende FT-Synthese durchzuführen. Für die Konversion des Synthesegases in methanreiches, kraftstofftaugliches Gas müssen die Wasserstoff- und Kohlenmonoxidanteile über einen geeigneten Methanisierungskatalysator in Methan und CO_2 umgewandelt und am Ende das CO_2 und Wasser aus dem Gemisch entfernt werden, wofür jedoch erprobte Technologien zur Verfügung stehen (Mozzafarian/Zwart 2003). Wenn die endotherme Vergasung und die exotherme Methanisierung bei der Umwandlung von Holz zu Methan optimal aufeinander abgestimmt sind, können in einer Anlage von 20 bis 100 MW Leistung Wirkungsgrade von etwa 55 Prozent bezogen auf die eingesetzte Energiemenge erreicht werden (Stucki 2003).

Laufende Forschungs- und Demonstrationsvorhaben

Das einzige derzeit in Deutschland realisierte Projekt ist eine 1-MW-Versuchsanlage der Firma CHOREN in Freiberg/Sachsen, die bereits über 10 000 Stunden im Einsatz war. Bei diesem dreistufigen sogenannten Carbo-V®-Verfahren wird zunächst durch autotherme Pyrolyse die Biomasse in Biokoks- und Schwelgas zerlegt. Mit Sauerstoff werden die Schwelgase bei 1 400 °C nachoxidiert. Der so erzeugte heiße Gasstrom dient als Vergasungsmittel und Wärmequelle. Die endotherme Vergasung des Koksstaubes im Flugstrom erfolgt mit diesem Gas am Brennkammeraustritt. Die Gaskonditionierung enthält eine CO_2-Wäsche, eine Feinreinigung und einen Shiftreaktor, um das benötigte H_2- zu CO-Verhältnis herzustellen. Über einen Eisen- oder Kobaltkatalysator werden dann die langkettigen Kohlenwasserstoffe gebildet. Entstehende Wachse müssen anschließend für eine hohe Kraftstoffausbeute mit Wasserstoff gecrackt werden (Baitz et al. 2004; Rudloff 2005).

Weitere Verfahren werden im Rahmen von Konzeptstudien und Demonstrationsprojekten beispielsweise im Forschungszentrum Karlsruhe (Henrich/Dinjus 2005), beim Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) (Boerrigter/van der Drift 2003), von der TU Bergakademie Freiberg (Meyer et al. 2005) und von der CUTEC GmbH (Claußen/Vodegel 2005) untersucht.

Im Rahmen von „renew“[16] ist Anfang 2004 ein großes EU-Forschungsprogramm mit einem Finanzvolumen von 19,8 Mio. Euro mit 31 Partnern unter anderem aus der Automobilindustrie ins Leben gerufen worden mit dem Ziel, die Entwicklung der Kraftstoffherstellung über den Weg der Biomassevergasung zu fördern.

Die großtechnische Synthesegaserzeugung aus Biomasse mit anschließender Konversion zu Kraftstoffen ist noch nicht realisiert und auch die Demonstrationsvorhaben zeigen, dass weiterer verfahrenstechnischer Entwicklungsbedarf besteht, bevor diese Konversionsroute zur Kraftstoffbereitstellung eingesetzt werden kann. Entscheidend für die Weiterentwicklung ist die Systemintegration der verfahrenstechnischen Teilschritte, die für sich gesehen alle bereits technologisch durchgeführt worden sind.

Ein weiterer Aspekt ist, dass sich der bisherige Wissensstand zur Biomassevergasung im Wesentlichen auf die Vergasung von Holz bezieht. Die Vergasung halmgutartiger Biomasse ist kaum untersucht und stellt aufgrund der spezifischen Zusammensetzung (hoher Anteil an Halogen) noch höhere technologische Anforderungen (Rudloff 2005).

Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Die Bilanzierung von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der synthesegasbasierten Biokraftstoffe ist mit größeren Unsicherheiten behaftet, als die der bereits etablierten Biokraftstoffe. Die Zahl der Veröffentlichungen zu diesem Thema ist überschaubar. Dies liegt vor allem daran, dass noch keine großtechnischen Anlagen kommerziell betrieben werden, deren Daten als Grundlage dienen könnten.

Es ist eine Vielzahl von prozesstechnischen Varianten denkbar, die diese Bilanz beeinflussen. Beispielsweise werden in Baitz et al. (2004) verschiedene Szenarien auf der Basis des CHOREN-Prozesses bilanziert. Wenn man das Ziel verfolgt, aus der Biomasse auch den für den Prozess benötigten Strom und Wasserstoff über die homogene Wassergasreaktion (Shiftreaktion) sowie die technischen Gase Sauerstoff und Stickstoff über Luftzerlegung zu erzeugen, damit die Anlage nur geringe Mengen an externer Energie benötigt, beträgt der fossile Energiebedarf 2 MJ/kg_{Diesel} (etwa 0,032 MJ/MJ Kraftstoff). Falls nur der benötigte Wasserstoff prozessintern erzeugt werden soll, hingegen Sauerstoff, Stickstoff und die benötigte Energie fossil erzeugt werden, liegt der fossile Energiebedarf bei 18,7 MJ/kg_{Diesel} (0,26 MJ/MJ Kraftstoff), also fast um einen Faktor 10 höher.

In Tabelle 27 sind für FT-Diesel die Daten aus CONCAWE (2003) und GEMIS 4.3 gegenübergestellt. Ein wichtiger Faktor ist, ob als Ausgangsstoff Restholz oder eigens angebautes Holz eingesetzt wird. Falls Überschussstrom ins Netz eingespeist wird, können bei Berücksichtigung der entsprechenden Gutschrift (Basis Kraftwerkspark) sogar negative Werte für den fossilen Energiebedarf und der THG-Emissionen erreicht werden (d. h. der Prozess wäre rechnerisch eine Treibhausgassenke).

[16] Weitere Informationen unter http://www.renew-fuel.com/.

Tabelle 27

FT-Diesel: fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$
CONCAWE 2003	Anbauholz zu FT-Diesel	0,06	7,3 (5,0–13,7)
GEMIS 4.3	Anbauholz zu FT-Diesel, brutto	0,16	18
	Anbauholz zu FT-Diesel inkl. Gutschrift für Überschussstrom, Basis Kraftwerkspark	(- 0,50)	(- 28)
CONCAWE 2003	Restholz zu FT-Diesel	0,07	4,6 (4,4–4,8)
GEMIS 4.3	Restholz zu FT-Diesel, brutto	0,08	7
	Restholz zu FT-Diesel inkl. Gutschrift für Überschussstrom, Basis Kraftwerkspark	(- 0,44)	(- 23)

Quelle: Öko-Institut 2005a

Weitere Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen bei der Kraftstoffproduktion auf Basis der Biomassevergasung hängen maßgeblich vom eingesetzten Rohstoff ab. Bei der Kraftstoffherstellung auf Basis von Reststoffen können nach IFEU (2004a) die Bilanzen für Stickoxide, Ammoniak und Phosphate durchaus positiv ausfallen, beim Einsatz von Anbaubiomasse bedingt durch den landwirtschaftlichen Anbau jedoch negativ. Die Bilanz fällt weiterhin positiver aus, wenn das Restgas als Energiequelle eingesetzt wird, da dann die Emissionen der fossilen Energiebereitstellung wegfallen.

Im Vergleich zum Restholz müssen bei Kurzumtriebsholz (bei Baitz et al. 2004 bilanziert als Stammholz) zusätzlich die Aufwendungen für Bestandsbegründung, Pflege, Kalkdüngung, Durchforstung etc. mit in die Bilanz einfließen. Ausschlaggebend für das Gesamtemissionsniveau bei einer WtW-Betrachtung bezüglich Versauerung und Eutrophierung ist jedoch weniger die Kraftstoffvorkette als vielmehr die Fahrzeugnutzung.

Nach GEMIS 4.3 ergibt sich folgendes Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial für FT-Diesel. Als Vergleich sind die entsprechenden Indikatoren zusätzlich für fossilen Dieselkraftstoff angegeben. Deutlich wird, dass bei Berücksichtigung der Koppelprodukte FT-Diesel gegenüber fossilem Dieselkraftstoff Vorteile sowohl bezüglich des Ozonbildungspotenzials als auch des Versauerungspotenzials aufweist (Tabelle 28).

Tabelle 28

FT-Diesel: Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial

	TOPP-Äquivalent in g/MJ_{out}	SO_2-Äquivalent in g/MJ_{out}
Diesel 2010	0,07	0,09
Anbauholz zu FT-Diesel, brutto	0,07	0,10
Anbauholz zu FT-Diesel inkl. Gutschrift für Überschussstrom, Basis Kraftwerkspark	0,01	0,04
Restholz zu FT-Diesel, brutto	0,07	0,04
Restholz zu FT-Diesel inkl. Gutschrift für Überschussstrom, Basis Kraftwerkspark	0,01	- 0,02

Quelle: Öko-Institut 2005a

Kosten

Die Kostenangaben in der Literatur variieren erheblich und reflektieren den Grad der Unsicherheit dieser Angaben. Einen repräsentativen Überblick bietet VIEWLS (2005). Dort werden die Kosten für verschiedene Kraftstoffe, die mittels Synthesegas hergestellt werden, für die kurz- und langfristige Zeitschiene angegeben (Tabelle 29). Es ist jedoch anzumerken, dass diese Daten unterschiedlichen Publikationen entnommen sind und damit teilweise Inkonsistenzen aufweisen. Als Vergleichsbasis werden die konventionellen fossilen Kraftstoffe kurzfristig mit 7,1 Euro/GJ und langfristig mit 9,4 Euro/GJ ausgewiesen.

Wichtige Einflussgrößen sind beispielsweise die Rohstoffkosten und die Effizienz der Vergasung. In Boerrigter/van der Drift 2003 wird deren Einfluss in verschiedenen Szenarien für eine 8 000-MW-Anlage zur Produktion von FT-Diesel untersucht und folgendermaßen gewichtet:

1. Einfluss Rohstoffpreis (70 Prozent Konversionseffizienz bei Vergasung):
   - 4 Euro/GJ: etwa 12 Euro/GJ für FT-Diesel (49 Prozent der Produktionskosten)
   - 2 Euro/GJ: etwa 9 Euro/GJ für FT-Diesel (23 Prozent der Produktionskosten)
   - 0,5 Euro/GJ: etwa 6,5 Euro/GJ für FT-Diesel (11 Prozent der Produktionskosten)
2. Einfluss Effizienz Vergasung (4 Euro/GJ Rohstoffpreis):
   - 55 Prozent: etwa 15 Euro/GJ für FT-Diesel
   - 70 Prozent: etwa 12 Euro/GJ für FT-Diesel
   - 85 Prozent: etwa 10 Euro/GJ für FT-Diesel

Fazit

Das aus der Biomassevergasung resultierende Synthesegas kann in verschiedene Kraftstoffe konvertiert werden. Derzeit wird vor allem der Pfad der Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von Dieselkraftstoff verfolgt. Es kann aber auch Methanol, Dimethylether, methanreiches Gas und Wasserstoff hergestellt werden. Die Synthesegaserzeugung aus Biomasse mit anschließender Konversion zu Kraftstoffen ist großtechnisch noch nicht realisiert, und die Demonstrationsvorhaben zeigen, dass weiterer verfahrenstechnischer Entwicklungsbedarf besteht, bevor diese Konversionsroute zur Kraftstoffbereitstellung wirtschaftlich beschritten werden kann. Entscheidend bei der weiteren Entwicklung ist die Systemintegration der verfahrenstechnischen Teilschritte. Zu beachten ist auch, dass für die Rohstoffbereitstellung eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Biomasselogistik aufgebaut werden muss. Es existieren kaum Veröffentlichungen zur Bilanzierung der Energie- und Treibhausgasemissionen für diesen Kraftstoffpfad, was daran liegt, dass er noch nicht großtechnisch realisiert wurde. Die in den verschiedenen Veröffentlichungen abgeleiteten Kosten variieren erheblich. In den nächsten zehn bis 15 Jahren ist nicht damit zu rechnen, dass es zu einer nennenswerten Durchdringung des Kraftstoffmarktes mit diesen synthetischen Kraftstoffen kommt.

Tabelle 29

Kraftstoffe über Biomassevergasung: Herstellungskosten

		vor 2010		nach 2010	
		Anbaubiomasse	**Reststoffe**	**Anbaubiomasse**	**Reststoffe**
FT-Diesel	Kosten	35,5	29,1	28,7	23,7
	Bandbreite	19–47	15,5–41	16–38	13–33
SNG	Kosten	29,5	27,4	16	14,7
	Bandbreite	2–733	25,5–31	14,5–19	13,5–18
DME	Kosten	23,2	20,6	18	16
	Bandbreite	19–31,5	17–29	14,5–24	13–22,5

Alle Angaben in Euro/GJ
Quelle: VIEWLS 2005

2.3.2 Bioethanol aus Lignozellulose

Die meisten Pflanzen enthalten Lignozellulose (Zellulose, Hemizellulose und Lignin), wobei der Anteil an Zellulose in der Regel 40 bis 60 Prozent, an Hemizellulose 20 bis 40 Prozent und an Lignin 10 bis 25 Prozent der trockenen Biomasse beträgt (Hamelinck et al. 2003). Aus den Zellulose- und Hemizelluloseanteilen kann über Vergärungsprozesse Ethanol hergestellt werden. Derzeit gibt es noch keine Anlage, die Ethanol auf Basis von Lignozellulose kommerziell herstellt. Jedoch wird für eine großtechnische Anwendung derzeit intensiv geforscht.

Rohstoffbasis

Besonders geeignete lignozellulosehaltige Biomasse sind Reststoffe aus der Landwirtschaft wie Stroh, Bagasse, Silagen und Energiepflanzen wie Futter- und Rohrglanzgräser, Rutenhirse sowie schnell wachsende Hölzer (Pappeln und Weiden). Auch Resthölzer und Hausmüll sind vielversprechende Ausgangsstoffe. Prinzipiell ist es möglich, verschiedene Rohstoffe in einer Anlage zu verwenden, was den Anwendungsbereich noch einmal erhöht (Multifeedstock). Die Zellulose- und Hemizelluloseanteile in den Pflanzen können über die Verzuckerung zu Alkohol verarbeitet werden. Der restliche Anteil ist dann Lignin, das nicht zur Herstellung von Zucker genutzt werden, aber für die Erzeugung von Prozessenergie eingesetzt oder aber über Vergasung und anschließende Synthese zu Kraftstoff weiterverarbeitet werden kann.

Verfahren für Ethanol aus Lignozellulose

Die Verarbeitung von lignozellulosehaltigen Rohstoffen erfordert einen der alkoholischen Gärung vorgeschalteten Verfahrensschritt, um aus den Zelluloseanteilen Zucker zu gewinnen, die sog. Hydrolyse. Hierfür gibt es unterschiedliche verfahrenstechnische Möglichkeiten.

Hydrolyse: Zuerst muss die Biomasse vorbehandelt werden, um sie zu reinigen und zu zerkleinern. Dann wird die Lignozellulose in C5- und C6-Zucker (Zuckermoleküle mit 5 bzw. 6 Kohlenstoffatomen) aufgespalten. Aufgrund der sehr festen Bindungen innerhalb der Zellulosemoleküle und zwischen den einzelnen Zelluloseketten stellt dies die größte technische Schwierigkeit bei der Verarbeitung der Rohstoffe dar. Die Aufspaltung kann prinzipiell entweder physikalisch/chemisch über Säureaufschluss oder über enzymatischen Aufschluss realisiert werden. In einem ersten Schritt werden das Lignin und die Hemizellulose verflüssigt. Freie Hemizellulosepolymere werden hierbei bereits hydrolysiert. Während der Hydrolyse können beim enzymatischen Aufschluss aus der Hemizellulose unerwünschte Nebenprodukte entstehen, die dann eine spätere Fermentation hemmen und damit die Ethanolausbeute reduzieren. Eine Kombination aus Dampfexplosion und milder Säure als Hydrolyseschritt hat den Vorteil, dass die Produktion unerwünschter fermentationshemmender Nebenprodukte gemindert wird und ein besserer Abbau der Hemizellulose gewährleistet ist (Hamelinck et al. 2003). Säurekatalysierte Dampfexplosion ist einer der kosteneffizientesten Prozesse für Holz und landwirtschaftliche Reststoffe. Ungünstig wirken sich allerdings die Kosten für Säure und säureresistente Materialien und der bei der Neutralisation des Abwassers anfallende Gips als Koppelprodukt aus. Eine vielversprechende Methode, die Zellulose aus der Biomasse freizulegen, ist daher die reine Dampfexplosion, die – da keine Säurezusätze erforderlich sind – umweltfreundlicher ist, bei der aber noch weitere Forschung und Entwicklung notwendig sind, um die Ausbeute auf ein wirtschaftlich effizientes Maß zu erhöhen.

Fermentation: Die Fermentation der C6-Zucker ist relativ einfach und wirtschaftlich zu realisieren, die Fermentation der C5-Zucker weist jedoch noch einige Probleme auf. Die Entwicklung ist vor allem darauf fokussiert, Mikroorganismen zu produzieren, die beide Zucker in gleichem Maße fermentieren, eine hohe Ausbeute an Ethanol ohne gleichzeitige Bildung von Zellmasse ermöglichen und nicht in der sauerstofffreien Umgebung der Fermentation langsam absterben. Es sind noch keine geeigneten Mikroorganismen bekannt, die alle diese Bedingungen erfüllen und ausreichend robust und kosteneffizient sind. Novem (2003) geben an, dass in naher Zukunft für die Fermentation gentechnisch hergestellte Hefe oder Bakterien genutzt werden können, die alle wesentlichen Zucker fermentieren. Mittel- bis langfristig werden dann die Fermentationseffizienz der Organismen – mehr Ethanol in weniger Zeit – und deren Resistenz verbessert. Auch gehen Forschungsarbeiten in die Richtung, Mikroorganismen zu entwickeln, die es ermöglichen, beide Prozesse – Hydrolyse und Fermentation – in einem Reaktor ablaufen zu lassen. Grundsätzlich können alle Prozessschritte des Verfahrens getrennt in je einem Reaktor durchgeführt werden. Stand der Technik ist derzeit, dass die Verzuckerung und die C6-Fermentation simultan, die C5-Fermentation und die Zellulaseproduktion jeweils getrennt davon durchgeführt werden (Simultaneous Saccharification and Fermentation, SSF). Der Vorteil der Zusammenführung mehrerer Verfahrensschritte besteht darin, dass die Anzahl der Reaktoren minimiert und damit die Effizienz des Prozesses erhöht werden kann. In einem Pilotversuch wird bereits ein Reaktor für die Hydrolyse und die gesamte Fermentation getestet, dieses Verfahren wird entsprechend SSCF (Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation) genannt und dient in CONCAWE (2003) als Referenzsystem zur Erzeugung von Ethanol aus Lignozellulose (Hamelinck et al. 2003).

Laufende Forschungs- und Demonstrationsvorhaben

Von der Iogene Corporation (Kanada) wurde eine Demonstrationsanlage zur Ethanolherstellung auf Lignozellulosebasis (Stroh) entwickelt und realisiert. Bei dem Prozess wird die Dampfexplosion mit verdünnter Schwefelsäure genutzt, um die Zelluloseketten freizulegen und die Hemizellulose in C5-Zucker zu überführen. Ein spezielles Enzym (Trichoderma reesi) verwandelt die Zellulose in Glukose, was in einem Zeitraum von zwei bis sieben Tagen bei „milden“ Konditionen durchgeführt wird. Der restliche Teil des Strohs, hauptsächlich Lignin, wird vom Zuckerwasser separiert und kann als Brennstoff verwendet werden. Iogene gilt mit ihrem Produkt Eco-Ethanol als ein technologisch führendes Unternehmen bei der enzymatischen Verarbeitung von lignozellulosehaltigen Rohstoffen zu Ethanol (Schmitz 2005). Weitere klei-

nere Demonstrationsanlagen zur Ethanolherstellung aus Lignozellulosematerialien wurden in den letzten Jahren von NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA) und BCI (BC International Corporation, Kanada) entwickelt (Novem 2003).

Schwerpunkte der weiteren Entwicklung sind eine umweltgerechte Aufarbeitung der Biomasse mit einem möglichst geringen Anteil an Abfall (geringer Säureeinsatz), die Lösung der Hemmkinetik bei der enzymatischen Aufspaltung der Zellulose mit deutlicher Kostenreduzierung bei der Herstellung der Zellulaseenzyme, Entwicklung einer verlässlichen und robusten C5-Fermentation mit einer möglichst hohen Ausbeute an Ethanol, die Nutzung von Mikroorganismen, die eine simultane Hydrolyse und Fermentation ermöglichen, und die klassische Systemoptimierung, um auch den Abfallstrom für die Energie- und Wärmeerzeugung zu nutzen (Novem 2003).

Kürzlich haben die Unternehmen IOGEN, Shell und VW vereinbart, eine gemeinsame Studie durchzuführen, um die technische und ökonomische Machbarkeit einer großen Produktionsanlage von Ethanol auf Lignozellulosebasis zu untersuchen (IOGEN 2006).

Im Rahmen der „Advanced Energy Initiative“ von US-Präsident Bush wird die Forschung und Entwicklung von verschiedenen Techniken zur Erzeugung von Biokraftstoffen in sogenannten Bioraffinerien unterstützt. Hierfür sollen 91 Mio. US-Dollar im Jahr 2006 und 150 Mio. US-Dollar im Jahr 2007aufgewendet werden (DoE 2006). In Kanada wird ebenfalls die Erzeugung von Ethanol aus Lignozellulose intensiv im Rahmen des „Renewable Energy Technology Program“ (RETP) gefördert. Auch die Iogene-Pilotanlage wird von der kanadischen Regierung unterstützt (IEA 2005).

Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Einen Überblick über den fossilen Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen von lignozellulosestämmigem Ethanol aus der Literatur gibt Tabelle 30. Welche Spannbreite allein durch unterschiedliche Anlagenkonzepte möglich ist, zeigt Schmitz (2005). Hier werden zwei verschiedene Konzepte zur Ethanolerzeugung aus Stroh bilanziert. Bei dem einen wird eine Kombination aus Stohlignin und Erdgas zur Feuerung eingesetzt. Bei dem anderen Konzept handelt es sich um eine optimierte Variante, bei der vollständig auf Erdgas als Energieträger verzichtet werden kann und fossile Energie (Diesel) nur noch zur Zermahlung des Strohs erforderlich ist. Der Primärenergiebedarf des optimierten Konzepts ist um einen Faktor 5, die Treibhausgasemissionen sind etwa um einen Faktor 7 niedriger (Tabelle 30).

Weitere Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen bei der Ethanolproduktion auf Basis von Lignozellulose variieren stark mit dem eingesetzten Rohstoff. So kann bei der Ethanolherstellung auf Basis von Anbaubiomasse die Bilanz für Stickoxide, Ammoniak und Phosphate durch den landwirtschaftlichen Anbau durchaus negativ ausfallen, beim Einsatz von Reststoffen kann sich dies jedoch umkehren (IFEU 2004a). Daten zum Ozonbildungs- und Versauerungspotenzial liegen derzeit noch nicht vor. Gegenüber dem klassischen Ethanol hat das lignozellulosestämmige Ethanol auf Basis beispielsweise schnell wachsender Hölzer (Pappel, Weide) jedoch den Vorteil, dass für deren Anbau geringerer Düngemittelbedarf als für den Anbau von Zuckerrüben und Weizen besteht.

Kosten

Über die Herstellungskosten von Ethanol über den Lignozellulosepfad besteht in der Literatur keine Einigkeit (Hamelinck et al. 2003, IEA 2005, IFEU 2004a, Novem 2003, Schmitz 2005, SE Ireland 2004, VIEWLS 2005). Die Bandbreite reicht von 16,45 Euro/GJ (Novem 2003) bis 69 Euro/GJ (VIEWLS 2005). Im Vergleich hierzu wird Ottokraftstoff mit derzeit ca. 7 Euro/GJ ausgewiesen. Es wird jedoch von allen Autoren davon ausgegangen, dass die Herstellungskosten in der Zukunft stark sinken werden. Einige Autoren erwarten für die Zeit nach 2010 Kosten von um die 9 Euro/GJ (Hamelinck et al. 2003, IEA 2005, Schmitz 2005), was unter der Annahme moderat steigender Preise von Ottokraftstoff konkurrenzfähig wäre.

Tabelle 30

Ethanol (Lignozellulose): Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$
CONCAWE 2003	Anbauholz	0,26	21 (18,4–28,4)
CONCAWE 2003	Restholz	0,26	17,2 (17–17,3)
IFEU 2004a	Lignozellulose	(- 0,16)–0,39	(- 12)–45
Schmitz 2005	Stroh (Lignin und Erdgas zur Energieerzeugung)	0,26	14,2
	Stroh (nur Lignin zur Energieerzeugung)	0,05	1,89

Quelle: Öko-Institut 2005a

Fazit

Aus den Zellulose- und Hemizelluloseanteilen von Biomasse kann über den vorherigen enzymatischen Aufschluss der (Hemi-)Zellulose in Vergärungsprozessen Ethanol hergestellt werden. Bei der Herstellung von Ethanol auf Basis von Lignozellulose – vor allem wenn Reststoffe als Rohstoffe verwendet werden – lassen sich die Treibhausgasemissionen gegenüber konventionellem Bioethanol noch einmal deutlich senken. Derzeit gibt es noch keine Anlage, die Ethanol auf Basis von Lignozellulose kommerziell herstellt. Jedoch wird für eine großtechnische Anwendung derzeit – vor allem in Nordamerika – intensiv geforscht. Die ersten Pilotprojekte zeigen, dass deutlicher Entwicklungsbedarf besteht, bevor diese Konversionsroute zur Kraftstoffbereitstellung wirtschaftlich beschritten werden kann. Schwerpunkt ist vor allem eine deutliche Kostenreduzierung bei der Herstellung robuster Enzyme zur Zellulosespaltung. Es ist nicht damit zu rechnen, dass in den nächsten zehn Jahren nennenswerte Mengen über diesen Krafftstoffpfad bereitgestellt werden. Er bietet aber aufgrund des im Vergleich zum konventionellen Ethanol unspezifischen Ausgangsmaterials erhebliche Potenziale für die Zukunft.

2.3.3 Weitere potenzielle Verfahren zur Kraftstoffherstellung

HTU-Diesel

Diesel kann auch über den Hydrothermal-Upgrading(HTU)-Prozess hergestellt werden. Im Unterschied zum Synthesegasverfahren wird beim HTU-Prozess das Zellulosematerial unter hohem Druck aber bei relativ niedriger Temperatur in Wasser gelöst. Der so gewonnene Rohstoff kann dann chemisch in Dieselkraftstoff umgewandelt werden.

Publikationen zu Bilanzierungen des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen sind nicht bekannt.

Hydrothermale Vergasung

Überkritische Wasservergasung ist ein alternativer Pfad, um sehr feuchte Biomasse effektiv stofflich und energetisch zu nutzen (Boukis et al. 2003). Hierbei wird die Biomasse in Wasser, das über den kritischen Punkt gebracht wird, ohne Zusatz von Sauerstoff in einem Batchreaktor vergast, und es entstehen je nach Prozessbedingungen Wasserstoff oder Methan. Als Reaktorkonzept kann die konventionelle Wirbelstromtechnologie angewendet werden. Ein Knackpunkt ist der Wärmeaustausch zwischen Biomasse und Produkt, da sich bei diesen hohen Temperaturen leicht unerwünschte Nebenprodukte wie Teer oder Koks aus der Biomasse bilden. Dieses Verfahren zur Herstellung von Biogas befindet sich noch im Anfangsstadium der Entwicklung. Nach Stucki (2003) lassen erste Modellberechnungen Wirkungsgrade von bis zu 80 Prozent erwarten.

Pyrolyse

Ein anderer Ansatz ist die schnelle Pyrolyse, bei der Biomasse schnell auf hohe Temperaturen unter Luftausschluss erhitzt, abgekühlt und das entstehende Biorohöl zu beispielsweise Diesel raffiniert wird. Dieses Verfahren befindet sich noch in der Entwicklung und muss für eine kommerzielle Anwendung weiterentwickelt werden (IEA 2005). Am Forschungszentrum Karlsruhe soll eine Versuchsanlage zur Pyrolyse von Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft errichtet werden (FZK 2006).

3. Wasserstoff

Wasserstoff ist ein Sekundärenergieträger, der im Prinzip aus jedem Primärenergieträger hergestellt werden kann. Die CO_2-arme Herstellung ist auf folgenden Pfaden denkbar:

– Dampfreformierung aus Erdgas mit CO_2-Abscheidung,

– Kohlevergasung mit CO_2-Abscheidung,

– direkte Erzeugung aus Biomasse mittels Vergasung,

– Elektrolyse mittels Strom aus erneuerbaren Energien,

– Elektrolyse mittels Strom aus fossilen Quellen mit CO_2-Abscheidung,

– Elektrolyse mittels Strom aus Kernenergie.[17]

Die Wasserstofferzeugung kann entweder zentral in Großanlagen mit anschließendem Transport des erzeugten Wasserstoffs oder dezentral direkt an den Tankstellen erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist die Erzeugung des Wasserstoffs im Fahrzeug selbst („on-board reforming“). Diese Technologie wird gegenwärtig aber von der Industrie nicht weiter verfolgt (Reijerkerk 2006).

Ausschlaggebend bei der Betrachtung der Konversionspfade von Wasserstoff ist auch die Bereitstellungsform. Die Energiedichte von gasförmigem Wasserstoff ist deutlich geringer als der von konventionellen Kraftstoffen. Daher wird dieser entweder tiefkalt verflüssigt (LH_2) oder komprimiert (CH_2) im Fahrzeugbereich eingesetzt.[18] Sowohl die Verflüssigung als auch die Komprimierung des gasförmigen Wasserstoffs sind mit einem hohen energetischen Aufwand verbunden.[19]

3.1 Dampfreformierung

Die Dampfreformierung ist ein erprobter Pfad zur industriellen Herstellung von Wasserstoff in zentralen Anlagen. Das Verfahren ist technisch ausgereift und es existieren große Reformierungsanlagen in der chemischen Industrie. Bei der Dampfreformierung wird Erdgas zur Vorkonditionierung katalytisch entschwefelt. Im folgenden Prozessschritt wird es dann in einer endothermen Reaktion mit Wasserdampf zu H_2 umgesetzt. Dieser Vorgang erfolgt in großtechnischen Anlagen bei Temperaturen über 700 °C und Drücken bis zu 25 bar an entspre-

---

17 Nach der Rechtslage ist allerdings in Deutschland gegenwärtig keine zusätzliche Erzeugung möglich. Die Nutzung der im Ausstiegsgesetz festgelegten Strommengen zur H_2-Erzeugung ließe keine Emissionsreduktion zu.

18 Auch sogenannte Hydridspeicher sind in diesem Zusammenhang diskutiert worden, die beim derzeitigen Stand der Technik jedoch nicht konkurrenzfähig sind.

19 CONCAWE (2003) gibt z. B. den für die Verflüssigung benötigten Energiebedarf mit 0,24 bis 0,4 MJ/MJ Kraftstoff an, der zukünftig auf 0,2 MJ/MJ Kraftstoff optimiert werden kann.

chenden Katalysatoren (ISI 2003). In einem weiteren Prozessschritt wird die Ausbeute an H_2 über die Umsetzung des entstandenen Kohlenmonoxids mit Wasserdampf erhöht (Wassergasshift). Anschließend wird das Gas einer Reinigung unterzogen, bei der Kohlendioxid und andere unerwünschte Bestandteile entfernt werden. Das dabei abgeschiedene Restgas kann zur Befeuerung des Reformers verwendet werden.

Die Reformierung aus Erdgas kann auch direkt an der Tankstelle, also dezentral, erfolgen. Dafür wird das Erdgas mit einem Druck von mindestens 1,6 MPa bereitgestellt (LBST 2002). Zusätzlich wird Energie an der Tankstelle benötigt, um den Druck auf bis zu 85 MPa für die Befüllung zu erhöhen.

Energiebedarf und THG-Emissionen

Der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen hängen im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

– Herkunft des Erdgases und Transportentfernung

– Art der Reformierung: zentral oder dezentral

– Herstellung von CH_2 oder LH_2

– Transportweg des Wasserstoffs zur Tankstelle bei zentraler Reformierung (Pipeline, Straße)

Die entsprechenden Pfade sind relativ gut untersucht (CONCAWE 2003, ISI 2003). Tabelle 31 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Bilanzierungen aus CONCAWE (2003). In ISI (2003) wird bei der zentralen Herstellung von komprimiertem Wasserstoff zusätzlich der Fall mit anschließender CO_2-Sequestrierung betrachtet.[20] Dabei steigt der Primärenergiebedarf von 1,62 auf 1,91 MJ/MJ, die Kohlendioxidemissionen sinken dagegen von 86,2 auf 11,2 g $CO_{2/MJ.}$ Der Primärenergiebedarf für die Herstellung von Wasserstoff enthält bei dieser Publikation auch den Energiegehalt des Kraftstoffs und ist daher nicht direkt mit CONCAWE (2003) vergleichbar.

Weitere Umweltauswirkungen

Weitere Umweltwirkungen der Wasserstoffherstellung (Well-to-Tank), wie z. B. Versauerungs- und Ozonbildungspotenzial, sind in der Literatur wenig bis überhaupt nicht untersucht worden. Die Diskussion konzentriert sich hier vielmehr auf die Reduktion der Emissionen bei der Nutzung des Wasserstoffs (Tank-to-Wheels) im Vergleich mit konventionellen Kraftstoffen.

Kosten

In ISI (2003) wird jeder der bilanzierten Herstellungspfade für Wasserstoff mit Kosten unterlegt. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass vor allem die Kosten für die Sequestrierung sehr schwer einzuschätzen und daher mit einer hohen Unsicherheit belastet sind (Tabelle 32).

[20] Zur Technologie der Sequestrierung siehe Anhang 4.

Tabelle 31

Wasserstoff (Dampfreformierung): fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad Reformierung	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$
CONCAWE 2003	CH_2, NG-EU-Mix, dezentrale Reformierung	0,83	104,6 (102,8–107,5)
	CH_2, NG 7 000 km, dezentrale Reformierung	1,09	123,4 (120,6–126,3)
	CH_2, NG 4 000 km, dezentrale Reformierung	0,94	111,7 (109,9–114,6)
	CH_2, NG 7 000 km, zentrale Reformierung, Transport H_2 per Pipeline	0,84	111,0 (108,3–113,4)
	CH_2, NG 4 000 km, zentrale Reformierung, Transport H_2 per Pipeline	0,69	99,4 (96,8–101,9)
	CH_2, NG 4 000 km, zentrale Reformierung, Transport H_2 per Straße	0,69	100,4 (98,1–102,8)
	LH_2, NG 7 000 km, zentrale Reformierung, Verflüssigung, Transport H_2 per Straße	1,35	143,1(135,1–151,4)
	LH_2, NG 4 000 km, zentrale Reformierung, Verflüssigung, Transport H_2 per Straße	1,15	128,1 (121,6–135,3)
	CH_2, NG 4 000 km, zentrale Reformierung, Verflüssigung, Transport H_2 per Straße, Verdampfung/ Komprimierung	1,29	134,5 (128,3–142,1)

Quelle: Öko-Institut 2005a

Tabelle 32

Wasserstoff (Dampfreformierung): Bereitstellungskosten

Publikation	Kraftstoffpfad Elektrolyse	Kosten in Euro/GJ
ISI 2003	CH_2, über dezentrale Reformierung, NG EU-Mix	12,83
	CH_2, über zentrale Reformierung, NG EU-Mix	11,69
	CH_2, über zentrale Reformierung, NG EU-Mix + CO_2-Seques trierung	15,72
	LH_2, über zentrale Reformierung, NG EU-Mix	17,59

Quelle: Öko-Institut 2005a

3.2 Vergasung

Relevante CO_2-arme Bereitstellungspfade für Wasserstoff, der über Vergasungsverfahren erzeugt wird, sind die Vergasung von Biomasse sowie von Kohle mit anschließender CO_2-Abscheidung. Prinzipiell kann jedoch auch jeder andere kohlenstoffhaltige Ausgangsstoff für die Erzeugung von Wasserstoff über Vergasung verwendet werden.

3.2.1 Kohlevergasung

Bei der Kohlevergasung handelt es sich um eine voll entwickelte, industriell angewandte Technologie, die beispielsweise mit anschließender Fischer-Tropsch-Synthese bei SASOL in Südafrika eingesetzt wird. Kohle kann dabei autotherm durch den Umsatz mit Sauerstoff und Dampf bei hohen Temperaturen in Synthesegas umgewandelt werden. Zur Kohlevergasung werden in der Regel entweder die Flugstromvergasung oder das Hochtemperatur-Winkler-Verfahren eingesetzt. Das Rohgas aus der Primärumsetzung muss anschließend einer CO-Konvertierung unterzogen werden, um die Ausbeute an Wasserstoff zu erhöhen. Vor der Konvertierung wird das Rohgas in der Regel noch in einer weiteren Prozessstufe entschwefelt. Im abschließenden Prozess wird der Wasserstoff dann aus dem konvertierten Gas abgetrennt. Um dieses Verfahren CO_2-arm zu gestalten, muss in einem weiteren Schritt das abgetrennte Kohlendioxid deponiert werden.

Energiebedarf und THG-Emissionen

Tabelle 33 gibt einen Überblick über den Energiebedarf und die THG-Emissionen bei der H_2-Herstellung via Kohlevergasung. Es wird deutlich, dass eine mögliche Sequestrierung die CO_2-Emissionen erheblich senken kann – um den Preis einer wesentlichen Erhöhung des Primärenergiebedarfs bei der H_2-Bereitstellung.

Kosten

Ebenso wie für den Herstellungspfad über Dampfreformierung sind in ISI (2003) für die bilanzierten Wasserstoffpfade Kosten angegeben (Tabelle 34).

Tabelle 33

Wasserstoff (Kohlevergasung): fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad Kohlevergasung	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$
CONCAWE 2003	CH_2, Steinkohlevergasung + H_2-Shift, Transport gasförmig per Pipeline, Kompression	1,14	191,8 (183,5–199,6)
ISI 2003	CH_2, Steinkohlevergasung[1]	1,82	149,5
	CH_2, Steinkohlevergasung + Sequestrierung[1]	2,73	21,99
	LH_2, Steinkohlevergasung[1]	2,10	163,3
	LH_2, Steinkohlevergasung + Sequestrierung[1]	3,06	38,2

[1] Energiebedarf inkl. Energiegehalt des H2
Quelle: nach Öko-Institut 2005a

Tabelle 34

Wasserstoff (Kohlevergasung): Bereitstellungskosten

Publikation	Kraftstoffpfad Elektrolyse	Kosten in Euro/GJ
ISI 2003	CH_2, Steinkohlevergasung	12,22
	CH_2, Steinkohlevergasung + Sequestrierung	24,36
	LH_2, Steinkohlevergasung	18,11
	LH_2, Steinkohlevergasung + Sequestrierung	30,08

Quelle: Öko-Institut 2005a

3.2.2 Biomassevergasung

Die Erzeugung von Wasserstoff kann auch aus der Vergasung von Biomasse erfolgen. Die Vorkonditionierung der Biomasse erfolgt wie in Kapitel V.2.3.1 beschrieben. Bei der Vergasung werden dann Bedingungen gewählt, die zu einem wasserstoffreichen Synthesegas führen. Bei der Hochtemperaturvergasung (T > 1 250 °C) wird die Biomasse nahezu komplett in Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasser konvertiert (Hemmes et al. 2003). Das Synthesegas wird gereinigt; über eine Wassergasshiftreaktion kann das entstandene CO weiter in Wasserstoff konvertiert werden. CO_2 wird mit den üblichen Verfahren aus dem Produktgas abgeschieden und kann prinzipiell auch sequestriert werden.

Energiebedarf und THG-Emissionen

Der Energiebedarf und die THG-Emissionen hängen zum einen davon ab, ob man Reststoffe oder Anbaubiomasse einsetzt. Zum anderen ist es von Bedeutung, ob ein zentrales oder dezentrales Konzept der Vergasung zum Einsatz kommt. Außerdem macht es einen Unterschied, ob LH_2 oder CH_2 erzeugt wird. Einen Überblick über die entsprechenden Ergebnisse gibt Tabelle 35.

Kosten

Die in der Literatur (IFEU 2004a, ISI 2003, VIEWLS 2005) angegebenen Erzeugungskosten von komprimiertem Wasserstoff liegen bei 8 bis 46,5 Euro/GJ, für flüssi-

Tabelle 35

Wasserstoff (Biomassevergasung): fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad Biomassevergasung	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$
CONCAWE 2003	CH_2, Restholzvergasung, dezentral, 10-MW-Anlage	0,19	10,7 (10,0–11,4)
	CH_2, Restholzvergasung, zentral in einer 200-MW-Anlage, Transport gasförmig per Pipeline	0,23	11,9 (11,1–12,7)
	CH_2, Anbauhölzer, dezentral, 10-MW-Anlage	0,22	15,2 (13,1–19,9)
	CH_2, Anbauhölzer, zentral in einer 200-MW-Anlage, Transport gasförmig per Pipeline	0,23	14,1 (12,7–18,1)
	LH_2, Anbauhölzer, zentral in einer 200-MW-Anlage, Verflüssigung, Transport flüssig auf der Straße	0,06*	8,0 (6,5–12,4)*

* Warum die Werte für flüssigen Wasserstoff kleiner ausfallen als für komprimierten, ist nicht nachzuvollziehen.
Quelle: Öko-Institut 2005a

gen Wasserstoff werden 13 bis 55 Euro/GJ angegeben. Die große Bandbreite spiegelt die unterschiedlichen Annahmen und die erheblichen Unsicherheiten wider.

3.3 Elektrolyse

Wasserstoff kann über die Elektrolyse von Wasser hergestellt werden. Hierbei handelt es sich um eine voll entwickelte, kommerziell eingesetzte Technologie zur industriellen Wasserstofferzeugung. Prinzipiell kann dieses Verfahren vergleichbar der Reformierung sowohl in großen zentralen Anlagen erfolgen als auch in vergleichsweise kleinen Anlagen direkt an der Tankstelle.[21] Ob der Bereitstellungspfad CO_2-arm ist oder nicht, hängt entscheidend von der Herkunft des für die Elektrolyse benötigten Stroms ab.

Die klassische Wasserelektrolyse erfolgt mittels eines alkalischein wässrigen Elektrolyten unter Verwendung eines porösen Asbestdiaphragmas, um die wechselseitige Vermischung der Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff zu verhindern. Es können auch protonenleitende Ionenaustauschermembranen oder bei einer Hochtemperaturdampfelektrolyse sauerstoffleitende Keramiken als Elektrolyt verwendet werden, beides Verfahren, die sich noch in der großtechnischen Entwicklung befinden. Ein Teil des Stroms kann bei hohen Temperaturen auch aus der entstehenden Wärme gewonnen werden. Der Aufwand für die abschließende Konditionierung des Wasserstoffs ist gering, da er in hoher Reinheit anfällt.

[21] So wird der Wasserstoff an der ersten Tankstelle im Rahmen des „Clean Energy Projects“ (CEP) über einen Elektrolyseur an der Tankstelle hergestellt.

Energiebedarf und THG-Emissionen

Nach CONCAWE (2003) korreliert die Effizienz der Elektrolyseanlage nicht signifikant mit der Größe. Der Wasserstoff wird mit einer Effizienz von 62 bis 70 Prozent und einem Druck von 3 MPa produziert. Das Ergebnis ist ein fossiler Energiebedarf von 0,19 MJ/MJ Kraftstoff und Treibhausgasemissionen von 9,1 g CO_2-Äquivalente/MJ Kraftstoff bei Nutzung von offshore erzeugtem Windstrom. Zum Vergleich ist hier die Elektrolyse mit Strom gemäß dem EU-Mix aufgeführt.

Kosten

Der treibende Kostenfaktor bei ISI (2003) für die Herstellung von Wasserstoff über Elektrolyse sind die Bereitstellungskosten für den Strombedarf. Die Größe der Elektrolyseanlage ist hingegen nicht relevant (Tabelle 37).

Tabelle 36

Wasserstoff (Elektrolyse): fossiler Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Publikation	Kraftstoffpfad Elektrolyse	fossiler Energiebedarf MJ_{fossil}/MJ_{out}	THG-Emissionen g $CO_{2äq}/MJ_{out}$
CONCAWE 2003	CH_2, zentrale Elektrolyse, Stromquelle Windkraft offshore	0,19	9,1 (8,4–9,9)
	CH_2, dezentrale Elektrolyse, Stromquelle EU-Mix	3,39	208 (199–218)

Quelle: nach Öko-Institut 2005a

Tabelle 37

Wasserstoff (Elektrolyse): Bereitstellungskosten

Publikation	Kraftstoffpfad Elektrolyse	Kosten in Euro/GJ
ISI 2003	CH_2, dezentrale Elektrolyse, Stromquelle Windkraft	43,86
	CH_2, zentrale Elektrolyse, Stromquelle Windkraft	42,97
	LH_2, dezentrale Elektrolyse, Stromquelle Windkraft	48,78
	LH_2, zentrale Elektrolyse, Stromquelle Windkraft	50,00
	CH_2, zentrale Elektrolyse, Stromquelle Wasserkraft	33,83
	CH_2, zentrale Elektrolyse, Stromquelle EU-Mix	35,64

Quelle: nach Öko-Institut 2005a

Fazit

Die Herstellung von Wasserstoff als Sekundärenergieträger in tiefkalt verflüssigter Form oder komprimiert gasförmig und damit für den potenziellen Einsatz als Kraftstoff im mobilen Sektor kann auf der Basis nahezu aller Primärenergieträger erfolgen. Potenziale für CO_2- und emissionsarme Kraftstoffpfade (WtT) basieren vor allen Dingen auf erneuerbaren Energieträgern, die zur Herstellung von Wasserstoff eingesetzt werden. Die Technologien können sowohl in zentralen Anlagen als auch potenziell an den Tankstellen realisiert werden.

Generell hat die Herstellung von tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff, die vor allem durch ökonomische Erwägungen gefördert wird, gegenüber der komprimierten Form unter Klima- und Energiegesichtspunkten Nachteile durch die hohen energetischen Aufwendungen bei der Verflüssigung.

Bei der Dampfreformierung von Erdgas hängen die Potenziale zur Reduzierung der THG-Emissionen vor allem vom – mit der Entfernung steigenden – Aufwand für den Erdgastransport und der Art der Reformierung ab. Dabei weist die zentrale Reformierung Vorteile gegenüber der Herstellung „on-site“ auf. Daneben hängen die Potenziale wie auch bei der Vergasung aus Kohle stark davon ab, inwieweit die CO_2-Sequestrierung technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar zu realisieren ist. Die Kohlevergasung ist energetisch aufwendiger als die Dampfreformierung, was auf die niedrigere Effizienz des Vergasungsprozesses zurückzuführen ist. Die Vergasung von Biomasse ist generell mit vergleichsweise niedrigen (fossilen) energetischen Aufwendungen und THG-Emissionen verbunden, wobei die Differenzen zwischen unterschiedlichen Varianten hier sehr gering sind. Sie sind vergleichbar mit den Werten bei der elektrolytischen Gewinnung des Wasserstoffs, wenn der Strom zur Herstellung von Wasserstoff auf regenerativer Basis erzeugt werden kann.

Generell sind die existierenden Kostendaten für die unterschiedlichen Bereitstellungspfade für Wasserstoff noch sehr wenig belastbar. Die vorliegenden Arbeiten deuten darauf hin, dass H_2 aus regenerativen Energiequellen in absehbarer Zukunft mit höheren Kosten verbunden sein kann als konkurrierende CO_2-arme Kraftstoffe. Die H_2-Bereitstellung aus Biomasse erscheint dabei heute als günstigster regenerativer Pfad. Wird H_2 aus Erdgas bereitgestellt, sind die Kosten wesentlich niedriger, jedoch die THG-Emissionen etwa 5- bis 10-fach höher als bei regenerativer Bereitstellung. Es besteht der Bedarf, die Kostendaten zu validieren und für belastbarere Zukunftsprojektionen mit entsprechenden Lernkurven zu hinterlegen.

Die vor etwa zehn Jahren noch verbreitet anzutreffende Euphorie bezüglich einer kurzfristigen breiten Markteinführung von Wasserstoff (besonders in Verbindung mit Brennstoffzellenfahrzeugen) in den Kraftstoffsektor ist inzwischen deutlich konservativeren Annahmen gewichen. Teilweise wird selbst ein Zeithorizont bis 2030 als noch zu optimistisch eingeschätzt (IPTS 2004a). Klar ist dennoch, dass bei einem langfristigen Ziel des Umstiegs auf Wasserstoff bereits heute hierfür Vorbereitungen starten müssen.

VI. Emissionsminderungspotenziale Well-to-Wheels

Zur Quantifizierung der technologischen Emissionsminderungspotenziale des Verkehrssektors ist eine integrierte Betrachtung erforderlich, die die Potenziale bei der Kraftstoffbereitstellung (Well-to-Tank, WtT) und diejenigen im Fahrzeug selbst (Tank-to-Wheels, TtW) zusammenführt. Die folgende Darstellung stützt sich wesentlich auf das Gutachten (Öko-Institut/IFEU 2006). Wie den entsprechenden Kapiteln (WtT: Kap. V, TtW: Kap. IV) zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Datenbasen der beiden Lebenswegabschnitte deutlich. Entsprechend unterschiedlich sind daher die Vorgehensweisen bei der Ableitung der WtT- und der TtW-Daten, die für die WtW-Analyse verwendet werden:

WtT

Es werden nur Kraftstoffvorketten betrachtet, die gegenüber den Referenzkraftstoffen Benzin und Diesel als CO_2-arm eingestuft werden und bis 2010 bzw. 2020 in relevanten Mengen im Markt vorhanden sein können und damit das Potenzial besitzen, langfristig nicht nur reine Nischenprodukte zu sein. Es haben sich dabei folgende Schwerpunkte ergeben: Biokraftstoffpfade, die bereits umfassend bezüglich Energieverbrauch, THG- und Schadstoffemissionen und Kosten untersucht wurden (Biokraftstoffe der ersten Generation), z. B. Biodiesel aus Raps und Ethanol aus Zuckerrüben sowie Getreidekörnern. Biokraftstoffpfade, die mit hoher Wahrscheinlichkeit relevant bzw. interessant für den deutschen Markt werden könnten und die noch nicht abschließend untersucht bzw. erprobt wurden sowie verfahrenstechnisch noch nicht in großem Maßstab realisiert sind. Hier sind beispielsweise die Erzeugung von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen aus Biomasse und Bioethanol aus Lignozellulose zu nennen. Weiterhin werden Kraftstoffpfade zur Herstellung von Wasserstoff, die z. T. großtechnisch erprobt (z. B. zentrale Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas) und z. T. in der Entwicklung sind (dezentrale Erzeugung an der Tankstelle), sowie Kraftstoffpfade, die ausgehend von fossilen Kraftstoffen eine CO_2-Sequestrierung unterstellen, betrachtet. Als Datenquellen für die Emissionen der Vorketten werden CONCAWE (2003), Gemis 4.3 und ISI (2003) verwendet.

TtW

Die Fahrzeugtechnologien zur Verbrauchsminderung werden nach den Kriterien Marktreife in den betrachteten Bezugsjahren, technologische Abgrenzbarkeit gegen andere Maßnahmen und Datenverfügbarkeit ausgewählt. Differenziert nach drei Fahrzeuggrößenklassen und zwei Fahrzyklen werden die Anteile der Technologien an den

Neuzulassungen der Bezugsjahre und die spezifischen Verbrauchsminderungen relativ zu den Neuzulassungen des Basisjahres abgeschätzt. Aus den einzelnen Maßnahmen werden Beispielkonfigurationen mit jeweils sich sinnvoll ergänzenden technischen Maßnahmen gebildet. Mit den Anteilen der einzelnen Technologien an den Neuzulassungen werden „mittlere Neuzulassungen“ definiert, die für die flottenbezogenen Berechnungen verwendet werden. Bereits die km-bezogenen Verbräuche dieser mittleren Neuzulassungen zeigen deutlich die große Bedeutung von Marktanteilen für Minderungseffekte, die zwar mathematisch trivial sind, aber in Bewertungen oft unterschätzt werden.

Vorgehensweise

Die Daten für die Fahrzeugkonfigurationen können nun mit den Vorketten der Kraftstoffe zu einer WtW-Analyse zusammengeführt werden. Um von den spezifischen Minderungspotenzialen der WtW-Analysen auf die Gesamtpotenziale der alternativen Kraftstoff-, Fahrzeug- und Antriebstechnologien schließen zu können, werden mit dem Modell TREMOD Szenarien des Kraftstoffbedarfs bis 2020 berechnet. Das Referenzszenario beruht auf der zu erwartenden Entwicklung der Verkehrsnachfrage und des Fahrzeugparks sowie den Annahmen zur Effizienzentwicklung bei konventionellen Fahrzeugen mit Otto- und Dieselantrieb.

Aufbauend auf dem Referenzszenario werden Minderungspotenziale durch den Einsatz alternativer Kraftstoffe ermittelt. In verschiedenen Szenarien werden hierfür die Flächenbedarfe berechnet, die sich bei der Substitution von fossilen Kraftstoffen durch Biokraftstoffe ergeben, und der Strombedarf für regenerativ erzeugten Wasserstoff, wenn 3 Prozent des PKW-Bestands im Jahr 2020 durch Wasserstofffahrzeuge ersetzt werden würde.

Gegenüber der europäischen CONCAWE-Studie (CONCAWE 2003), die oft als Referenz für WtW-Analysen herangezogen wird, bestehen zwei Hauptunterschiede. Erstens wird hier bei den Vorketten und den übrigen Rahmenbedingungen explizit die deutsche Situation zugrunde gelegt, nicht wie in CONCAWE die der EU-15. Zweitens wird hier die gesamte Fahrzeugflotte in die Analyse einbezogen und nicht nur ein einzelnes Referenzfahrzeug (in CONCAWE ein PKW der Golfklasse). Dieses Vorgehen ist notwendig, will man nicht nur technologische Einzelpotenziale, sondern die Minderung der Gesamtemissionen des Verkehrs in den Blick nehmen. Hierfür sind über das Potenzial der technischen Maßnahmen hinaus ihre Marktdurchdringung und die erbrachten Fahrleistungen in den Analysejahren mit einzubeziehen.

1. WtT – Technologieauswahl und Quantifizierung

Für die quantitative Analyse kommen von den in Kapitel V (Kraftstoffe und Energieträger) qualitativ diskutierten Kraftstoffpfaden (vgl. Tabelle 19) diejenigen infrage, bei denen genügend belastbare Daten der Ökobilanzen zur Verfügung stehen.[22]

Im Folgenden wird für die Biokraftstoffe – mit Ausnahme des Kraftstoffpfades Bioethanol aus Lignozellulose – Gemis 4.3 als Datengrundlage verwendet. Diese Daten beziehen sich auf den deutschen Raum und können direkt für die Jahre 2010 und 2020 generiert werden. Sie sind in der Tabelle 38 zusammengefasst.[23]

Für die Kraftstoffvorketten der Herstellung von Ethanol auf Basis von Lignozellulose, DME über Synthesegas und Wasserstoff, werden die Daten von CONCAWE (2003) verwendet.[24]

Für die Herstellung von Wasserstoff werden auch zwei verschiedene Pfade mit CO_2-Sequestrierung mit einbezogen. Datengrundlage für die Kraftstoffvorkette ist hier ISI (2003) für das Jahr 2020. In dieser Studie wurden jedoch nur die CO_2-Emissionen bilanziert, sodass das WtW-Ergebnis nicht direkt mit den anderen vergleichbar ist.

Generell ist bei den Biokraftstoffen zu beachten, dass die Gutschriften für Nebenprodukte die Ergebnisse stark beeinflussen. Bei pflanzenölstämmigen Kraftstoffen sowie konventionellem Ethanol wird bei weiterem Ausbau zu erwarten sein, dass auch weniger „wertvolle“ Äquivalenzprozesse substituiert werden, womit die Nettoemissionen (und auch die Kosten) leicht ansteigen. Bei den Biokraftstoffen der sog. zweiten Generation FT-Diesel (d. h. BtL) und lignozellulotischem Ethanol sowie Biogas sind die Emissionen jedoch auch ohne Gutschriften sehr gering bzw. der „Absatz“ des BtL-Nebenprodukts Strom ist über die Netzeinspeisung gesichert, sodass hier von stabilen Ergebnissen auszugehen ist, die sich bei stärkerer Marktdurchdringung nicht nennenswert ändern (bzw. bei den Kosten durch Lerneffekte positive Effekte aufweisen).

Tabelle 39 gibt noch einmal zusammenfassend die Kosten für die Biokraftstoffe für die Jahre 2010 und 2020 wieder. Hier ist beim Vergleich z. B. mit dem Preis für Diesel oder Benzin zu beachten, dass die Kosten der biogenen Kraftstoffe nur den monetären Herstellungsaufwand ohne Gewinnmarge und ohne Steuern beinhalten.

---

22 Außerdem wird ETBE hier nicht weiter verfolgt, da es – vor allem aus Kostengründen – abzusehen ist, dass es nur in geringen Mengen dem Kraftstoff beigemischt werden kann. Der regenerative Anteil bei z. B. 15 Prozent ETBE läge also nur bei etwa 7 Prozent. ETBE ist damit strategisch von geringem Interesse.

23 GEMIS 4.3 wurde im zweiten Halbjahr 2005 auf der Basis neuer Erkenntnisse aktualisiert, die endgültige Fassung lag erst im Dezember 2005 vor, sodass es zu leichten Unterschieden im Vergleich mit den Ergebnissen zur WtT-Analyse (Kap. V) kommt. Dies macht sich vor allem bei den Vorketten der konventionellen Kraftstoffe Benzin und Diesel bemerkbar, die auf der Basis der o. g. Arbeiten aktualisiert wurden. Die konventionelle Bioethanolherstellung wurde an den derzeitigen Anlagenpark in Deutschland angepasst.

24 Die CONCAWE-Studie ist für die EU-15 mit dem Basisjahr 2010 erarbeitet worden und kann damit für Deutschland 2020 nur indikativ herangezogen werden.

Tabelle 38

Treibhausgasemissionen verschiedener Kraftstoffvorketten für Deutschland 2010 und 2020

	CO_2-Äquivalent		CO_2		CH_4		N_2O	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
Diesel	11,7	11,6	10,8	10,9	0,035	0,030	0,000	0,000
RME	65,2	64,3	29,9	29,2	0,079	0,074	0,113	0,113
RME + Gutschrift	18,2	17,3	- 13,7	- 14,4	0,008	0,004	0,107	0,107
FT-Diesel Holz-KUP	16,4	16,4	9,2	9,2	0,028	0,028	0,022	0,022
FT-Diesel Holz-KUP + Gutschrift	- 28,7	- 29,5	- 33,7	- 34,8	- 0,044	- 0,036	0,020	0,020
FT-Diesel Holz-Wald	7,6	7,6	5,3	5,3	0,021	0,021	0,006	0,006
FT-Diesel Holz-Wald + Gutschrift	- 37,4	- 38,3	- 37,6	- 38,7	- 0,051	- 0,042	0,005	0,005
Benzin	15,9	15,8	14,9	14,9	0,037	0,032	0,000	0,000
Erdgas	12,0	12,1	8,0	8,2	0,167	0,164	0,000	0,000
EtOH-Weizen + Gutschrift	53,2	53,5	40,7	41,0	0,088	0,087	0,035	0,035
EtOH-Zuckerrüben	62,2	62,2	45,4	45,4	0,098	0,097	0,049	0,049
Biogas-Rinder + Schweinegülle	17,4	16,6	16,8	16,0	0,019	0,016	0,001	0,001
Biogas-Biomüll	5,1	4,7	4,5	4,2	0,019	0,017	0,001	0,001
Biogas-Mais + Rindergülle	22,8	21,6	15,6	15,0	0,024	0,021	0,022	0,021
Biogas-Feuchtgut	23,2	20,4	15,1	13,9	0,020	0,018	0,026	0,021

RME: Rapsmethylester; FT-Diesel: Fischer-Tropsch-Diesel; KUP: Kurzumtriebsplantagen; EtOH: Ethanol. Unter Gutschriften werden hier die Emissionen verstanden, die durch die Nutzung von Koppelprodukten zusätzlich vermieden werden. Angaben in g/MJ_{out} (Well-to-Tank).
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 39

Kosten für Biokraftstoffe in den Jahren 2010 und 2020

	Kosten 2010	Kosten 2020
RME	21,9	23,6
RME + Gutschrift	21,9	23,6
FT-Diesel Holz-KUP	28,9	29,8
FT-Diesel Holz-KUP + Gutschrift	24,4	24,6
FT-Diesel Holz-Wald	19,1	19,4
FT-Diesel Holz-Wald + Gutschrift	14,7	14,2
EtOH-Weizen + Gutschrift	20,0	20,9
EtOH-Zuckerrüben	32,8	34,8
Biogas-Rinder + Schweinegülle	7,8	7,0
Biogas-Biomüll	9,0	7,9
Biogas-Mais + Rindergülle	19,1	18,7
Biogas-Feuchtgut	11,0	10,5

Angaben in $Euro_{2000}/GJ$
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Zum Vergleich sind in der Tabelle 40 die Kraftstoffpreise der konventionellen fossilen Kraftstoffe Benzin und Diesel für den privaten Verbraucher ex- und inklusive Steuern aufgeführt (EWI/Prognos 2005).[25]

Deutlich wird, dass die Biokraftstoffe auch unter Kostenaspekten konkurrenzfähig sein werden, wenn ein geminderter Steuersatz angenommen wird. Dies gilt insbesondere für Biogas, FT-Diesel aus Waldrestholz und BioEtOH aus Weizen.

[25] EWI/Prognos (2005) geht von der aus heutiger Sicht sehr moderaten Preisannahme von 37 US-Dollar/bbl bis 2030 aus. Daher erstellt Prognos zzt. im Auftrag des BMWi eine „Hochpreisvariante“ für Rohöl. Auch die Internationale Energie-Agentur (IEA) wird in ihrem in Arbeit befindlichem „World Energy Outlook 2006“ einen Ölpreis im Bereich von 40 bis 50 US-Dollar/bbl für 2020 ansetzen, die Europäische Umweltagentur (EEA) rechnet in ihren Szenarien mit 35 Euro/bbl in 2030 im Referenzfall sowie mit 50 Euro/bbl, um den gegenwärtigen Preistrend zu reflektieren (EEA 2006). Im Update der EU-WtW-Studie wird als obere Grenze ebenfalls mit 50 US-Dollar/bbl als Rohölpreis gerechnet (CONCAWE 2005).

Tabelle 40

Kraftstoffpreise für private Verbraucher ohne bzw. mit Steuern

	Preis 2010	Preis 2020
Benzin ohne Steuern	14,5	15,8
Benzin mit Steuern	33,9	36,1
Diesel ohne Steuern	9,6	10,5
Diesel mit Steuern	25,2	27,1

Angaben in $Euro_{2000}$/GJ
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006, versteuerte Preise nach EWI/Prognos 2005

2. TtW – Technologieauswahl und Quantifizierung

In Kapitel IV sind die fahrzeugseitigen Potenziale von Einzeltechnologien zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und zur Emissionsminderung diskutiert worden. Diese Einzeltechnologien müssen nun in die (gedachten) Neufahrzeuge des Jahres 2010 bzw. 2020 integriert werden und zwar in sinnvollen und technologisch machbar scheinenden Konfigurationen. Für diese Konfigurationen wird dann aus den Potenzialen der technologischen Einzelmaßnahmen die Gesamtminderung des Kraftstoffverbrauchs gegenüber „Business-as-usual“-Fahrzeugen abgeschätzt.

Die Auswahl der Maßnahmen bzw. ihre Zusammenfassung zu „sinnvollen“ Konfigurationen ist unter verschiedenen Aspekten nicht unproblematisch. Beispielsweise ist ihre Abgrenzung schwierig, wenn es verschiedene Technologien zur Nutzung desselben Effizienzpotenzials gibt. So werden z. B. zur motorischen Wirkungsgradverbesserung von Ottomotoren im Teillastbereich u. a. Benzindirekteinspritzung, „downsizing“, Abgasturbolader (ATL), variable Ventilsteuerung, Zylinderabschaltung und variables Verdichtungsverhältnis diskutiert und zum Teil auch angewendet. Man kann daher deren Potenziale nicht einfach addieren, da der gleichzeitige Einsatz dieser Techniken nicht sinnvoll ist. Damit stellt sich die Frage, welche dieser Maßnahmen wo auf der Skala von „inkompatibel“ über „möglich, aber nur bedingt sinnvoll“ bis „nur zusammen sinnvoll“ angesiedelt sind. Die Beantwortung dieser Frage kann nur subjektiv auf der Basis von Experteneinschätzungen erfolgen.

Für bestimmte Fahrzeugkomponenten wie Getriebe oder Starter ist diese Abgrenzung wesentlich unproblematischer, ebenfalls für physikalische Kategorien wie Fahrzeugmasse, Roll- und Luftwiderstand. Beim Thema Antrieb werden daher hier nur umfassende Konzepte bzw. Maßnahmenbündel betrachtet, konkret: „Direkteinspritzung + „downsizing“ + ATL“ und Hybridkonzepte. Darüber hinaus werden für alle Fahrzeuge wirksame Fortschritte der „allgemeinen Motorenentwicklung“ abgeschätzt. Bei den Hybridkonzepten wird zwischen milden und (Voll-)Parallelhybriden unterschieden.

2.1 Quantifizierung der Verbrauchsreduktionen durch technologische Maßnahmen am Fahrzeug

Es werden drei Fahrzeugklassen jeweils für Otto- und Diesel-PKW definiert: „klein“ (< 1,4 l Hubraum), „mittel“ (1,4–2 l) und „groß“ (> 2 l). Als Fahrzyklen werden der Innerorts- und Außerortsteil des NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) herangezogen. Für das Basisjahr 2004 werden für diese Fahrzeugklassen und Fahrzyklen die mittleren Kraftstoffverbräuche der Neuzulassungen bestimmt.

Als nächster Schritt erfolgt eine Abschätzung von spezifischen Verbrauchsminderungen der ausgewählten Technologien relativ zu den Neuzulassungen des Basisjahres, differenziert nach Bezugsjahren, Fahrzeugklassen und Fahrzyklen. Zusätzlich werden die Anteile der Technologien an den Neuzulassungen der Bezugsjahre abgeschätzt.

Die Basis für die Abschätzung der spezifischen Reduktionen bilden die in Kapitel IV dokumentierten Daten sowie ergänzend Öko/DLR/IE/IFEU/TU-DD 2006. Sie lassen sich für praktisch alle Maßnahmen folgendermaßen charakterisieren:

– Die Daten selbst wie auch die Rahmenbedingungen (Bezugsjahre, Fahrzeugklassen, Fahrzyklen etc.) spannen erhebliche Bandbreiten für die einzelnen Maßnahmen auf.

– In der geforderten Differenzierung nach Fahrzeugklassen und Straßenkategorien liegen für keine Maßnahme homogene Informationen („aus einer Quelle“) vor.

– Auch für einzelne Referenzpunkte (Bezugsjahr, Fahrzeugklasse, Fahrzyklus) liegen kaum passende Daten vor.

Aufgrund dieser Datenlage erfolgt die Quantifizierung in Form von plausiblen Schätzwerten.

Den Schwerpunkt der Studie bilden PKW bzw. der PKW-Verkehr. Entsprechend konzentrieren sich die Analysen auf diese Fahrzeugart. Busse und motorisierte Zweiräder werden wegen ihrer geringen Fahrleistung und daher auch nur geringen absoluten Reduktionspotenziale nicht betrachtet. Für leichte Nutzfahrzeuge werden die Minde-

rungsraten der PKW übernommen. Schwere Nutzfahrzeuge können aufgrund der schlechten Datenlage nur qualitativ diskutiert werden.

Die ausgewählten Reduktionsmaßnahmen bzw. -maßnahmenbündel werden im Folgenden kurz skizziert. Die entsprechenden Daten für die einzelnen Maßnahmen und die sich damit ergebenden mittleren Verbräuche über alle Maßnahmen sind in Anhang 5 in Tabelle 66 im Detail aufgeführt.

EURO 5

Für Maßnahmen zur Einhaltung von toxischen Schadstoffemissionsvorschriften sind motorische Maßnahmen oder eine Abgasnachbehandlung erforderlich. Motorische Maßnahmen sind typischerweise direkt wirkungsgradmindernd, während die Nachbehandlung mit Filtern und Katalysatoren einen Gegendruck aufbaut, dessen Überwindung Energie verbraucht. Bei mittleren und großen Diesel-PKW ist durch die größere Abgasmenge eine Nachbehandlung zur Einhaltung der Grenzwerte erforderlich, während für kleine PKW motorische Maßnahmen mit geringeren Verlusten als ausreichend angenommen werden.

Allgemeine Motorenentwicklung

Hierunter fallen Verbesserungen an allen Komponenten des Motors, die nicht mit der Einführung neuer Fahrzeugtechnologien verbunden sind, z. B. geringere bewegte Massen im Motor, reduzierte Reibung, schrittweise Verbesserungen an Ladern, Einspritzpumpen und Ventilen. Lader und Einspritzpumpen werden für Otto-PKW gesondert betrachtet, während für Diesel-PKW Verbesserungen dieser Komponenten hier erfasst sind.

Reduktion des Fahrzeuggewichts inkl. Sekundäreffekte

Hierunter fallen kontinuierliche Verbesserungen an allen Komponenten des Fahrzeugs. Literaturangaben zeigen keine eindeutigen Tendenzen hinsichtlich Fahrzeuggröße und Fahrzyklus. Lediglich Fortschritte über 2010 hinaus scheinen sinnvoll. Für mittlere und große PKW wird die Fortsetzung des Trends zu größeren Fahrzeugen angenommen, mit dem Effekt, dass 2020 ein Teil der Fahrzeuge keine Gewichtsreduktion aufweist.

Reduktion des Rollwiderstands

Diese Maßnahme wird durch Sicherheitsaspekte begrenzt. In Experimentalreifen werden zwar Reduktionen von mehr als 50 Prozent vom durchschnittlichen Rollwiderstand erreicht, doch können diese Reifen auch für zukünftige Bezugsjahre nicht als typisch betrachtet werden. Realistischer sind Reduktionen um 20 bis 30 Prozent. Die Verbrauchsminderung fällt tendenziell innerorts stärker aus.

Reduktion des Luftwiderstands um 10 Prozent bzw. 30 Prozent

Für die Reduktion des Luftwiderstands werden zwei Stufen betrachtet, deren erste in allen Fahrzeugkategorien relativ leicht realisierbar ist, mit allerdings nur mäßigen Effekten. Die zweite Stufe ist nur begrenzt umsetzbar. Für eine Reduktion um 30 Prozent muss die Form und Frontfläche der Fahrzeuge gegenüber konventionellem Design stark geändert werden. Dies beeinflusst das Raumangebot. Kleine PKW bieten dafür kaum Spielraum. Die Reduktion des Luftwiderstands wirkt vor allem bei höheren Geschwindigkeiten, also außerorts.

Benzindirekteinspritzung, Downsizing, Abgasturbolader

Die Anteile steigen bis 2020, allerdings für verschiedene Fahrzeugklassen unterschiedlich. Damit wird berücksichtigt, dass für mittlere und große PKW der Hybridanteil größer ist. (Für die Hybridkonzepte werden jedoch keine Maßnahmen für den Verbrennungsmotor spezifiziert, sondern in den summarischen Minderungsraten miterfasst.) Das Maßnahmenbündel führt vor allem im Teillastbereich zu Wirkungsgradverbesserungen und damit innerorts zu Verbrauchsreduktionen.

Start-Stop-Automatik

Für diese Technik wird angenommen, dass sie für praktisch alle Nichthybride der Klassen mittel und groß eingeführt wird; Hybride enthalten sie als festen Konzeptbestandteil bzw. ersetzten sie durch andere Verfahren. Kleine PKW werden zu gleichen Anteilen mit Start-Stop-Automatik bzw. mit konventionellen Anlassern und Lichtmaschinen ausgerüstet. Start/Stop wirkt praktisch nur innerorts und ist für alle Fahrzeugkategorien in etwa gleich wirksam.

Getriebe

Potenziale liegen in automatisierten Schaltgetrieben (ASG) und stufenlosen Getrieben (CVT), zwischen denen hier nicht unterschieden wird. CVT wurden bereits mehrfach in Serienfahrzeugen geliefert, die Kundenakzeptanz war jedoch stets gering. Vorhersagen, welches Getriebekonzept welche Anteile erzielt, sind kaum möglich. Die Anteile werden mit gleicher Begründung wie für Start/Stop angesetzt. (Für Hybride sind Getriebe eng an das Gesamtdesign gekoppelt und daher im Gesamtkonzept mit erfasst.) Durch die häufigeren Lastwechsel und Teillast wirken die Getriebe vor allem innerorts verbrauchssenkend.

Hybridtechnik

Als milde Hybride werden Konzepte mit einem Leistungsverhältnis Verbrenner/ Elektromotor von < 23 Prozent bezeichnet, als Vollhybride solche mit einem Leistungsverhältnis von > 38 Prozent. Mischhybride vereinen die Kraftflussoptionen von seriellen und Parallelhybriden und sind damit, was Anzahl und Verbindung der Komponenten betrifft, den Parallelhybriden ähnlicher. Der

Toyota Prius ist ein meist als Parallelhybrid bezeichneter Mischhybrid. Dieses offensichtlich marktreife Hybridkonzept wird hier betrachtet.

Die Hybridtechnik wird als für kleine PKW zu aufwendig angesehen. Es wird angenommen, dass milde Hybridtechnik bei mittleren PKW stärker eingesetzt wird als bei großen, während für die aufwendigeren Vollhybride eine umgekehrte Relation angenommen wird. Die Anteile steigen schrittweise. Die Technik wirkt innerorts stärker als außerorts (Start/Stop bzw. Elektroantrieb, Rekuperation im Stop-and-go-Verkehr). Der Effekt ist für Otto-PKW größer als für Diesel-PKW, da Diesel-PKW relativ günstigere Teillastwirkungsgrade haben.

Konzept (optimiertes visionäres Gesamtsystem)

Höhere Reduktionspotenziale als mit Hybridantrieben (plus maßvollen Gewichtsreduktionen) lassen sich bei Otto- und Diesel-PKW nur mit zurzeit noch praxisfernen Verbindungen von extremem Leichtbau mit optimierten Antrieben erreichen. Ein entsprechendes Konzept des Rocky Mountain Institute ist unter dem Namen HyperCar bekannt.[26] Hier werden sowohl Otto- als auch Dieselfahrzeuge, jeweils mit konventionellem und Hybridantrieb betrachtet. Allerdings wird auch für 2020 nur ein sehr geringer Marktanteil angenommen.

Brennstoffzellentechnik (Wasserstoff)

Für diese Fahrzeuge werden extrem große Verbrauchsreduktionen gegenüber Verbrennern erwartet (Referenz hier: Otto-PKW). Eine relevante Marktdurchdringung liegt jedoch noch in weiter Ferne (> 2020). Technisch ist zwischen Fahrzeugen mit Flüssig- oder Druckwasserstofftank und Hybriden mit zusätzlicher Batterie zu unterscheiden. Das natürlich auch hier aufwendigere Hybridkonzept hat den Vorteil, dass die Brennstoffzelle, die unter Teillast effizienter ist als unter Volllast, kleiner dimensioniert werden kann. Die genannten Differenzierungen sind im Rahmen dieses Projekts nicht darstellbar. Hier werden lediglich generische Brennstoffzellen-PKW (mit konventioneller Karosserie etc.) betrachtet. Die Reduktionspotenziale werden gleich denen der Konzepthybrid-PKW gesetzt, d. h. mit Verbrauchsreduktionen, die innerorts größer sind als außerorts.

2.2 Reduktionspotenziale von Beispielkonfigurationen

Zur Illustration der Effekte fahrzeugseitiger Maßnahmen sind Beispielkonfigurationen mit typischen Maßnahmenbündeln, die insbesondere auch maximale Reduktionspotenziale abbilden, anschaulicher als die Darstellung isolierter Einzelmaßnahmen. Für die folgende Analyse wurden sechs Fahrzeugkonfigurationen definiert (jeweils in den Größenklassen „klein“, „mittel“ und „groß“). Diese zeigt Tabelle 41.

[26] Siehe z. B. http://www.rmi.org/sitepages/pid386.php.

– „Konventionell“: Dies ist ein Fahrzeug, bei dem zusätzlich zu einer deutlichen Verringerung der Fahrwiderstände (Gewicht, Roll-, Luftwiderstand) eine Palette von antriebsseitigen Weiterentwicklungen eher konventioneller Natur realisiert ist.
– „Milder Hybrid“: Dieses Fahrzeug wird von einem Hybridmotor angetrieben mit einem kleineren elektrischen Aggregat (nicht für die Größenklasse „klein“ verfügbar).
– „Vollhybrid“: Dieser unterscheidet sich vom milden Hybrid durch eine größere Dimensionierung des elektrischen Antriebs (nicht für die Größenklasse „klein“ verfügbar).
– „Konzept“: Dies ist ein visionäres Fahrzeug, bei dem eine extreme Reduktion der Fahrwiderstände mit optimierten Antrieben verknüpft wurde.
– „Konzepthybrid“: Bei diesem Fahrzeug kommt zusätzlich ein Hybridantrieb zum Einsatz.
– „H_2-BZ“: Dies ist ein Fahrzeug mit einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle.

Für diese Konfigurationen wurden die Kraftstoffverbrauchsminderungen gegenüber dem gegenwärtig in Deutschland vorhandenen Fahrzeugpark (PKW-Mix 2004) berechnet. Das Ergebnis in Tabelle 42 zeigt, dass sich bei der Ausschöpfung „konventioneller“ Maßnahmen beträchtliche Effizienzpotenziale erschließen lassen. Die größten Reduktionen unter den marktnahen Konfigurationen resultieren für Hybridkonzepte, dort besonders für Vollhybride. Im Mittel aller Größenklassen ergeben sich für die Konzept-PKW und Brennstoffzellen-PKW deutlich niedrigere Verbräuche als für die konventionellen und Hybridneuzulassungen 2020. Allerdings sind die Daten für diese Technologien auch mit besonders großen Unsicherheiten behaftet.

Um einen Eindruck davon zu erhalten, welcher tatsächliche Einfluss auf die Fahrzeugflotte und damit die gesamte mit technischen Maßnahmen zugängliche Verbrauchsreduktion erreichbar ist, wird hier ein „durchschnittlicher Neuwagen“ definiert, bei dem die obigen Fahrzeugkonfigurationen mit ihrem (geschätzten) Anteil an den gesamten Neuzulassungen für die Jahre 2010 und 2020 eingehen. Die Werte hierfür sind in Tabelle 43 aufgeführt.

Der Vergleich der verschiedenen optimierten Beispielkonfigurationen mit dem Mix mit Anteilsgewichtung zeigt darüber hinaus, dass die Verbreitung der Maßnahmen unter den Neuzulassungen eine entscheidende Rolle spielt. In anderen Worten: Für deutlichere Reduktionen sind vor allem die hohen Potenziale noch eher visionärer Konzepte erforderlich und/oder eine wesentlich schnellere Marktdurchdringung relativ ausgereifter Maßnahmen.

Als Zwischenergebnis des hier entwickelten technologischen Szenarios lässt sich nun der absolute Kraftstoffverbrauch der Fahrzeugflotte (Otto und Diesel) bezogen auf die gefahrenen Kilometer direkt angeben. Die Werte sind in Tabelle 44 aufgeführt und gehen in die Berechnungen mit TREMOD (Kap. VI.5) ein.

Tabelle 41

Fahrzeugkonfigurationen mit umgesetzten technischen Maßnahmen

technische Maßnahmen	Fahrzeugkonfiguration					
	konventionell	milder Hybrid	Vollhybrid	Konzept	Konzepthybrid	H_2-BZ
allgemeine Motorenentwicklung	+	+	+	+	+	
Reduktion des Fz.-Gewichts	+	+	+			+
Reduktion des Rollwiderstands	+	+	+			+
Reduktion des Luftwiderstands (– 10 %)	kl					
Reduktion des Luftwiderstands (– 30 %)	mi/gr	+	+			+
GDI, „downsizing“, ATL	+					
Start-Stop-Automatik	+					
Getriebe (ASG, CVT)	+					
milder Hybridantrieb		+				
Vollhybridantrieb			+		+	
Konzept				+	+	
H_2-Brennstoffzellen						+

Kl: Fahrzeuge mit Hubraum unter 1,4 l, mi/gr: Fahrzeuge mit Hubraum größer 1,4 l
Quelle: eigene Zusammenstellung nach Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 42

Kraftstoffverbräuche der Beispielkonfigurationen

PKW	Technologie	Otto-PKW Verbrauch	Otto-PKW Änderung[1]		Diesel-PKW Verbrauch	Diesel-PKW Änderung		BZ[2]
		2004	2010	2020	2004	2010	2020	2020
klein	PKW-Mix	198			148			
	konv.	–	- 43	- 48	-	- 26	- 30	–
mittel	PKW-Mix	240			205			
	konv.	–	- 57	- 64	–	- 38	- 44	–
	milder Hybrid	–	- 65	- 71	–	- 43	- 50	–
	Vollhybrid	–	- 88	- 93	–	- 63	- 69	–
groß	PKW-Mix	304			264			
	konv.	–	- 70	- 78	–	- 48	- 57	–
	milder Hybrid	–	- 79	- 87	–	- 56	- 64	–
	Vollhybrid	–	- 108	- 114	–	- 81	- 88	–
alle[3]	PKW-Mix	236			223			
	konv.	–	- 54	- 61	–	- 43	- 51	–
	milder Hybrid	–	- 50	- 55	–	- 47	- 54	–
	Vollhybrid	–	- 74	- 79	–	- 68	- 74	–
	Konzept	–	–	- 95	–	–	- 92	–
	Konzepthybrid	–	–	- 116	–	–	- 111	–
	H_2-BZ	–	–	–	–	–	–	- 124

alle Angaben in MJ/100 km
1 bezogen auf den PKW-Mix 2004
2 BZ: Brennstoffzellen-PKW; Reduktion bezogen auf Otto-PKW
3 alle: Mittelwert nach Fahrleistungsanteilen der Größenklassen gewichtet
Quelle: nach Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 43

Kraftstoffverbrauch eines durchschnittlichen Neuwagens

PKW	Otto-PKW			Diesel-PKW		
	Verbrauch	Änderung*		Verbrauch	Änderung	
	2004	2010	2020	2004	2010	2020
	MJ/100km					
klein	198	- 24	- 48	148	- 18	- 29
mittel	240	- 36	- 67	205	- 26	- 45
groß	304	- 46	- 87	264	- 35	- 62
alle**	236	- 34	- 63	223	- 31	- 53

* bezogen auf den PKW-Mix 2004
** Mittelwert nach Fahrleistungsanteilen der Größenklassen gewichtet
Quelle: nach Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 44

Kraftstoffverbrauch der Fahrzeugflotte

PKW-Klasse	Fahrzyklus	Otto-PKW			Diesel-PKW		
		Verbrauch	Änderung*		Verbrauch	Änderung	
		2004	2010	2020	2004	2010	2020
klein	gesamt	198	174	150	148	129	119
	io	265	226	187	181	155	143
	ao	167	152	136	132	118	109
mittel	gesamt	240	204	173	205	178	159
	io	344	278	223	277	234	206
	ao	198	177	158	175	157	144
groß	gesamt	304	258	218	264	228	201
	io	484	387	306	371	312	269
	ao	254	225	199	224	201	182
alle*	gesamt	236	202	172	223	193	170

* Mittelwert nach Fahrleistungsanteilen der Größenklassen gewichtet
Angaben in MJ/100 km; io: innerorts; ao: außerorts
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

2.3 Zusatzkosten

Die Abschätzung zukünftiger Kosten von Technologien zur Verbrauchs- bzw. CO_2-Reduktion ist mit Unsicherheiten behaftet, die noch deutlich größer sind als die der Abschätzung der Minderungspotenziale. Vereinfacht gesagt ist dies darin begründet, dass Kosten stärker von nur sehr grob abschätzbaren Einflüssen abhängen. Beispiele:

– Die Nachfrage nach einem bestimmten Rohstoff zur Verwendung in einem völlig anderen Produkt kann die Kostenentwicklung für ein betrachtetes Produkt, das den Rohstoff ebenfalls einsetzt, massiv beeinflussen.

– Vorausgesetzt eine Lernkurve ist korrekt in Bezug auf die kumulierte Produktion, hängt eine brauchbare Kostenabschätzung für ein konkretes Bezugsjahr immer noch von der korrekten Abschätzung der Produktion bis zum Bezugsjahr, und damit von der Marktdurchdringung und letztlich dem Käufer-/Anwenderverhalten mit all seinen Unwägbarkeiten, ab.

Im Rahmen des Gutachtens Öko-Institut/IFEU (2006), das die Grundlage dieser Darstellung bietet, wurden grobe Abschätzungen der zusätzlichen Kosten vorgenommen, die mit den Maßnahmen verbunden sind, deren Potenziale quantifiziert wurden. Ausgenommen davon ist die Maßnahme „Allgemeine Motorenentwicklung“, deren Kosten kaum quantifizierbar sind.

Basis der Abschätzung waren vor allem die Literaturauswertung in IFEU (2005a) und Öko/DLR/IE/IFEU/TU-DD (2006). Abweichend von den meisten vorliegenden Studien werden in Öko/DLR/IE/IFEU/TU-DD (2006) die Kosten differenziert nach Fahrzeuggrößenklassen abgeschätzt. Eine Unterscheidung zwischen 2010 und 2020

wird hier nicht durchgeführt. Die Daten für die einzelnen Maßnahmen sind in Tabelle 45 zusammengefasst, die für einige Beispielkonfigurationen in Tabelle 46. Die realen Kosten können in einer Bandbreite von mindestens – 33 Prozent bis 50 Prozent um die angegebenen Schätzwerte liegen. Umfangreiche Kostendaten, allerdings nur für die Kompaktklasse, finden sich auch in CONCAWE (2003 u. 2005), ebenfalls mit Hinweis auf die großen Unsicherheiten. Eine ausführliche Diskussion von Gemeinsamkeiten bzw. Unterschieden in den Kostenschätzungen ist daher nicht sinnvoll.

Wie eingangs erwähnt, gehen die ungefähren Kosten der einzelnen Maßnahmen in die Abschätzung der Verbreitung einzelner Maßnahmen mit ein. Technische Verfügbarkeit unterstellt, sind wesentliche Faktoren für die tatsächliche Marktdurchdringung die Entwicklung der Energiepreise und – für das relativ stark emotionsbehaftete Produkt PKW durchaus wichtig – Spaß- und Prestigewert. Geländefahrzeuge mit Hybridantrieb und faktisch höherer Leistung als ihre konventionellen Pendants mögen den emotionalen Zusatznutzen für die Zusatzkosten liefern. Der Toyota Prius als mittelgroßer PKW verkauft sich gut, bei allerdings unklarer Preiszusammensetzung. Hochinnovative Klein- und Kompaktwagen sind mehrfach auf den Markt gebracht worden und letztlich gescheitert. Andererseits ergeben sich insbesondere für die Beispielkonfiguration „PKW klein“ Zusatzkosten, die möglicherweise im Rahmen der Trends zu größeren Fahrzeugen und mehr Komfort (in allen Klassen) und damit höheren PKW-Preisen ohne weitere Reflektion der Kunden akzeptiert werden. Dem wiederum steht die aktuell extrem ausgeprägte Neigung der Konsumenten zu scharfem Preisvergleich entgegen. Zusammenfassend: Die Daten geben einen Überblick über die Größenordnungen der Zusatzkosten der betrachteten Maßnahmen und Beispielkonfigurationen. Weiter gehende Folgerungen können daraus nicht abgeleitet werden.

In CARB (2004) wurde trotz der großen Unsicherheiten bei der Bestimmung von Zusatzkosten der Versuch gemacht, diese zu den erwarteten Einsparungen bei den Kraftstoffkosten in Beziehung zu setzen. Die Quintessenz für mit einem Zeithorizont von 2009 marktreife „Technologiepakete“, die in etwa vergleichbar sind mit der Konfiguration „konventionell“, lautete: „Nahezu alle Technologiekombinationen die modelliert wurden, bewirkten Verringerungen der Betriebskosten, die die Anschaffungskosten der Technologien überstiegen“ (CARB 2004, S. 102; Übersetzung durch TAB). Allerdings ist diese Analyse auf die amerikanischen Verhältnisse zugeschnitten und nicht direkt auf Deutschland zu übertragen.

Tabelle 45

Zusatzkosten pro Fahrzeug (Grobabschätzung) fahrzeugseitiger Maßnahmen zur Verbrauchs- bzw. CO_2-Reduktion

	Otto-PKW			Diesel-PKW		
	klein	**mittel**	**groß**	**klein**	**mittel**	**groß**
Reduktion des Fz.-Gewichts inkl. Sekundäreffekte	250	340	430	270	360	460
Reduktion des Rollwiderstands	70	80	110	50	70	100
Reduktion des Luftwiderstands (– 10 %)	30	40	50	20	30	40
Reduktion des Luftwiderstands (– 30 %)	–	190	250	–	170	220
Benzindirekteinspritzung (GDI), „downsizing“, Abgasturbolader (ATL)	400	600	800	–	–	–
Start-Stop-Automatik	200	300	400	200	300	400
Getriebe (automatisierte Schaltgetriebe, stufenloses Getriebe)	200	300	400	200	300	400
milder Hybrid	–	2.000	2.500	–	2.000	2.500
Vollparallel(misch)hybrid	–	3.500	4.000	–	3.500	4.000
Konzept	2.000	3.000	4.000	2.000	3.000	4.000
Konzepthybrid	3.000	4.500	6.000	3.000	4.500	6.000
H_2-Brennstoffzellen	5.000	10.000	15.000	–	–	–

Zeithorizont 2010/2020, alle Angaben in Euro
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 46

Gesamtzusatzkosten pro Fahrzeug (Grobabschätzung) fahrzeugseitiger Maßnahmen zur Verbrauchs- bzw.CO_2-Reduktion in Beispielkonfigurationen

PKW	Technologie	Otto-PKW	Diesel-PKW	Brennstoffzellen-PKW*
klein	konv.	1.200	700	–
mittel	konv.	1.800	1.200	–
	milder Hybrid	2.600	2.600	–
	Vollhybrid	4.100	4.100	–
groß	konv.	2.400	1.600	–
	milder Hybrid	3.300	3.300	–
	Vollhybrid	4.800	4.800	–
alle	konv.	1.600	1.000	–
	milder Hybrid	1.800	1.800	–
	Vollhybrid	2.900	2.800	–
	Konzept	2.700	3.200	–
	Konzepthybrid	4.100	4.800	–
	H_2-BZ	–	–	9.200
	H_2-BZ	–	–	9.200

* Zusatzkosten Brennstoffzellen-PKW bezogen auf Otto-PKW
Zeithorizont 2010/2020, alle Angaben in Euro
Quelle: nach Öko-Institut/IFEU 2006

2.4 Wirkungsgrade der Nutzung alternativer Kraftstoffe

Otto- und Dieselkraftstoffe einerseits und die zu ihrer Substitution geeigneten Kraftstoffe (z. B. Erdgas, Ethanol, RME) unterscheiden sich zum Teil deutlich in ihren Verbrennungseigenschaften. Daraus resultieren Wirkungsgradunterschiede, die bei der Abschätzung der WtW-Potenziale zu berücksichtigen sind. Hinzu kommen ggf. Verbrauchserhöhungen, wenn die Kraftstoffe besonders schwere Speicher erfordern, vor allem bei gasförmigen Kraftstoffen (Erdgas, Wasserstoff).

Die Annahmen zu diesen Effekten werden im Folgenden kurz skizziert. Die Daten werden jeweils auf die mittleren neu zugelassenen Otto- bzw. Dieselfahrzeuge angewendet, in denen bereits alle betrachteten Maßnahmen mit ihren Anteilen an den Neuzulassungen gewichtet enthalten sind.

Erdgas

In Kolke (2004) werden für Kleinwagen im Gasbetrieb in 2010 gleiche Wirkungsgrade und höhere Verbräuche (Resultat der höheren Fahrzeugmasse) angesetzt wie für mit Ottokraftstoff betriebene Fahrzeuge. In Stan (2005) und Umierski (2004) werden für optimierte Gasmotoren Wirkungsgrade im Bereich von Dieselmotoren erwartet. Hilfsweise werden im vorliegenden Bericht die Verbräuche von Ottofahrzeugen im Erdgas- und Benzinbetrieb gleichgesetzt. Die Methanemissionen werden gemäß IFEU (2005c) angesetzt.

Wasserstoff

In Kolke 2004 werden für Kleinwagen im Wasserstoffbetrieb in 2010 gleiche Wirkungsgrade und höhere Verbräuche (Resultat der höheren Fahrzeugmasse) angesetzt wie für mit Ottokraftstoff betriebene Fahrzeuge. Andere Studien weisen große Verbrauchsreduktionen aus, beispielsweise – 17 Prozent in 2010 bezogen auf Otto-PKW (GM 2002). Da die Kosten der Infrastruktur und der Speicheraufwand im Fahrzeug erheblich sind, erscheint Wasserstoff jedoch nur für extrem effiziente Verbraucher sinnvoll. Daher werden hier nur wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge untersucht.

Ethanol und Methanol

Alkohole verbrennen mit höheren Wirkungsgraden als Kohlenwasserstoffe. In Koßmehl (1995) werden für optimierte Motoren 10 Prozent und mehr angegeben. Die Daten in Kolke (2004) sind dagegen nicht eindeutig. Hier wird ohne Unterscheidung zwischen Fahrzyklen und Ethanol- bzw. Methanolanteilen im Ottokraftstoff pauschal eine Verbrauchsreduktion für alle Fahrzeugklassen und Jahre von 2,5 Prozent gegenüber dem Benzinbetrieb angenommen.

RME

Nach Koßmehl (1995) ergeben sich für Teillast geringere und für Volllast höhere Wirkungsgrade als für Diesel. Für

den Gesamtbetrieb von Pflanzenölmethylestern (PME; nicht notwendigerweise RME) werden höhere Verbräuche angegeben, allerdings ohne Nennung des Fahrzyklusses. Für PME/Dieselgemische (bis 10 Prozent PME) sollen sich höhere Wirkungsgrade als für Dieselkraftstoff ergeben. In Anlehnung an Kolke (2004) werden die Wirkungsgrade hier gleichgesetzt.

BTL

Für BTL wird allgemein von einer guten Anpassbarkeit an motorische Anforderungen ausgegangen, für die jedoch keine zwingenden Belege vorliegen. Hilfsweise werden hier die gleichen Verbräuche wie für den Dieselbetrieb angesetzt.

2.5 Direkte Emissionsfaktoren alternativer Kraftstoffe

Die direkten CO_2-Emissionen und die Heizwerte der Kraftstoffe werden CONCAWE (2003) entnommen, da dort auch Daten für die verschiedenen alternativen Kraftstoffoptionen angegeben werden. Die direkten CO_2-Emissionen der regenerativ hergestellten Kraftstoffe werden entsprechend den IPCC-Richtlinien gleich Null gesetzt. Neben CO_2 werden im Fahrbetrieb als Treibhausgase Methan und Lachgas freigesetzt. Diese Emissionen werden als CO_2-Äquivalente basierend auf Emissionsfaktoren in TREMOD 4 (IFEU 2005c) und dem Handbuch für Emissionsfaktoren (INFRAS 2004) erfasst. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 47 zusammengefasst.

Tabelle 47

Direkte Emissionen von Treibhausgasen für verschiedene Kraftstoffe

	Heizwert MJ/kg	Treibhausgasemissionsfaktor g CO_2Äquivalent/MJ
Methan	50,0	55,6
Biogas	50,0*	0,6
NG EU-Mix	44,8	57,0
NG Russland	49,2	55,7
Wasserstoff	120,1	0,0
Benzin	43,2	73,5
Diesel	43,1	74,0
FT-Diesel Biomasse	44,0	0,8
Biomethanol	19,9	0,2
Bio-DME	28,4	0,8
Bioethanol	26,8	0,2
RME	36,8	0,8

* Der Heizwert von Biogas beruht auf Schätzungen; bei den biogenen Kraftstoffen werden entsprechend den IPCC-Richtlinien die CO_2-Emissionen gleich Null gesetzt. Alle anderen Treibhausgasemissionen werden entsprechend der internationalen Berichterstattung bei der Berechnung berücksichtigt.

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

2.6 Schwere Nutzfahrzeuge

Für schwere Nutzfahrzeuge stellt sich die Datenlage sehr viel ungünstiger dar als für PKW. Das Vorhaben, Vergleichsstudien auszuwerten, die jeweils verschiedene Technologien betrachten, musste aufgegeben werden, da die Literaturrecherche ergab, dass solche Studien für LKW praktisch nicht existieren. Zu LKW-Antriebstechnologien und anderen Aspekten wie z. B. Leichtbau besteht damit erheblicher Forschungsbedarf. Einzeldaten zu bestimmten Maßnahmen liegen nur in sehr viel geringerer Menge vor. Als halbquantitative Aussage lässt sich lediglich festhalten, dass die Maßnahmen zur Reduktion der Fahrwiderstände – Gewicht, Rollreibung, Luftwiderstand – bei LKW möglicherweise größere Potenziale haben als bei PKW. Ein Vorgehen wie für PKW ist damit hier nicht realisierbar. Es werden daher die Verbräuche gemäß TREMOD für alle Bezugsjahre angesetzt. Diese Daten orientieren sich u. a. an

– Zielvorgaben eines japanischen FuE-Programms für umweltfreundliche LKW. Hauptziel des Programms sind Minderungen von Schadstoffemissionen, jedoch bei gleichzeitiger Optimierung der Kraftstoffeffizienz. Für eine „super-clean diesel engine“ wird ein um 10 Prozent reduzierter Verbrauch gegenüber aktuellen konventionellen Motoren angestrebt. Untersucht werden außerdem alternative Kraftstoffe wie DME und Erdgas sowie Hybridkonzepte. DME und Erdgas sind allerdings unter Infrastrukturaspekten problematisch; für schwere Nutzfahrzeuge, die vor allem außerorts und bereits mit hohem Motorwirkungsgrad fahren, ist der Hybridantrieb weniger vorteilhaft als für PKW. Daher werden in TREMOD keine DME-, Erdgas- bzw. Hybrid-LKW, sondern lediglich konventionelle Diesel-LKW betrachtet.

– Verwendet werden ferner Angaben von Nutzfahrzeugherstellern zu Verbrauchsentwicklungen von LKW unter besonderer Berücksichtigung zukünftiger Abgasgrenzwerte. Die Gesamtheit der Angaben weist ein erhebliche Bandbreite zwischen Verbrauchserhöhung (Begründung bzw. Ursache: zusätzliche Aggregate und Eigenverbräuche) und -reduktion (Begründung bzw. Ursache: Verbrauchsoptimierung des Motors, wenn ohnehin eine Abgasnachbehandlung unvermeidbar ist) auf.

Die Reduktion des Verbrauchs der Neuzulassungen wird daraus für 2010 mit 10 Prozent und für 2020 mit 18 Prozent gegenüber EURO 3 abgeschätzt.

3. WtW-Analyse

Zur Analyse der WtW-Gesamtsysteme werden aussagekräftige und anschauliche Kombinationen der WtT- und TtW-Teilsysteme gebildet bzw. ausgewählt. Die Diskussion erfolgt für die Bezugsjahre 2010 und 2020 in gesonderten Kapiteln.

3.1 WtW-Betrachtung 2010

Für das Jahr 2010 werden für PKW mit Diesel- und Ottomotor jeweils die Treibhausgasemissionen WtW für den PKW-Mix dieses Jahres für verschiedene fossile und alternative Kraftstoffoptionen dargestellt. Bei den für diesen frühen Zeitpunkt relevanten alternativen Kraftstoffen handelt es sich um die Biokraftstoffe der ersten Generation und um Biogas. Hinzugefügt sind zusätzlich die Treibhausgasemissionen der WtW-Analysen für die fossilen Kraftstoffe für das Vergleichsjahr 2004, um die zukünftigen Minderungspotenziale in Bezug zum heutigen Stand der Technik einordnen zu können.

Die WtW-Betrachtung für 2010 (Abbildung 11) zeigt, dass über die im Trendszenario unterstellten Effizienzmaßnahmen die Treibhausgasemissionen der konventionell angetriebenen PKW verglichen mit dem Basisjahr 2004 um etwa 14 Prozent abnehmen. Der in der Abbildung 11 deutlich sichtbare Vorteil des Erdgas-PKW gegenüber dem Diesel-PKW ist darin begründet, dass der Diesel-PKW im Mix 2010 und 2020 größer ist als der Otto-PKW-Mix in den entsprechenden Jahren, der bezogen auf den Energieverbrauch die Grundlage für den Erdgas-PKW bildet. Bei einem Vergleich Diesel versus Erdgas bei gleich großen PKW wäre dieser Vorteil bezüglich der Treibhausgasemissionen deutlich geringer.

Wie bereits im Kapitel V (Kraftstoffe und Energieträger, WtT) diskutiert, zeigt sich auch bei der WtW-Betrachtung die starke Abhängigkeit der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoff von der Anrechnung der Gutschriften in deren Vorketten. Besonders auffällig ist dies im Falle von RME, dessen Minderungspotenzial je nach Nutzung der Koppelprodukte (Extraktionsschrot substituiert Sojaschrot als Futtermittel; Glyzerin wird z. B. als Pharmagrundstoff eingesetzt) gegenüber der Nutzung von fossilem Dieselkraftstoff zwischen 20 und 80 Prozent liegen kann.

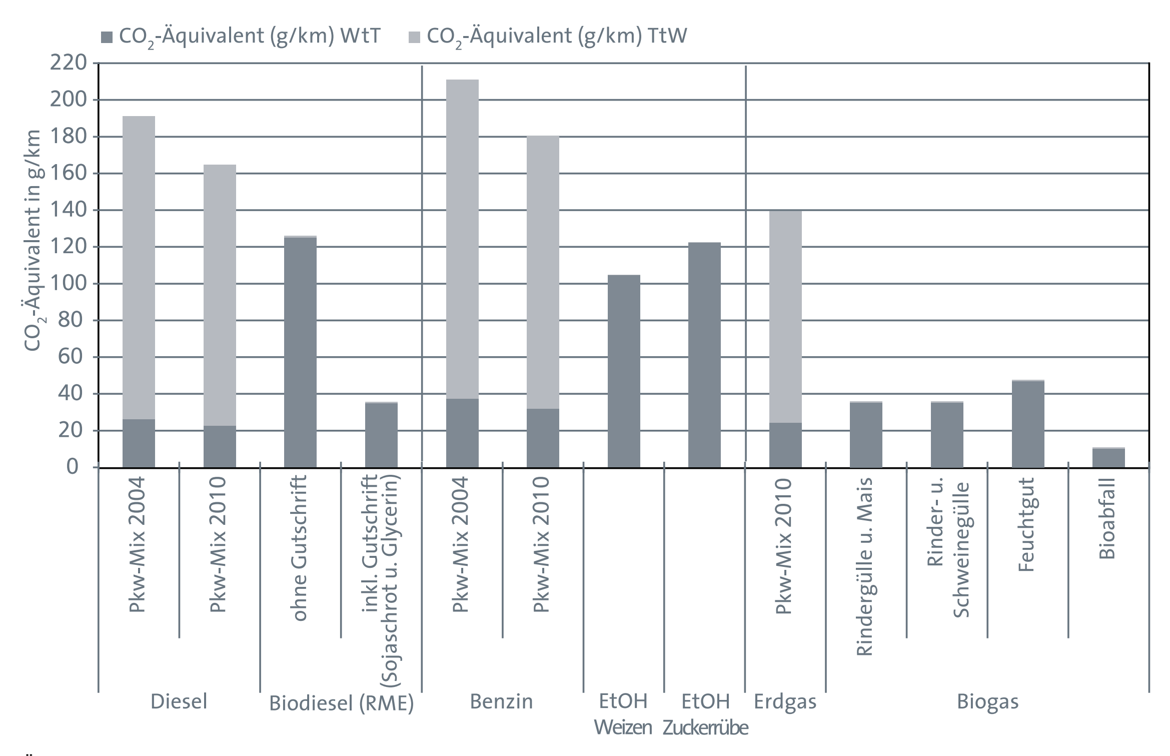
Insgesamt zeigt sich, dass auch die Biokraftstoffe der ersten Generation (RME und Bioethanol auf Basis von Weizenkörnern oder Zuckerrüben) in jedem Fall einen Vorteil gegenüber den fossilen Kraftstoffen bezüglich der Treibhausgasemissionen aufweisen.

Unter Aspekten der Treibhausgasminderung sehr interessant erscheint in diesem Falle auch Biogas, das aus Gülle, einer Mischung von Gülle und Mais oder aber auch aus Bioabfall oder Feuchtgut (2-Kulturen-Systeme) hergestellt werden kann. Gegenüber dem Gas fossilen Ursprungs kann z. B. aus Bioabfall hergestelltes methanreiches Gas die Treibhausgasemissionen um rund 90 Prozent mindern.

Abbildung 11



WtW-Darstellung für PKW mit Diesel- und Ottomotor 2010



Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

3.2 WtW-Betrachtung 2020

Im Jahr 2020 liegt die Minderung der Treibhausgasemissionen allein durch die Effizienzverbesserung des durchschnittlichen PKWs bezogen auf das Basisjahr 2004 bei etwa 25 Prozent (Abbildung 12 für Diesel, Abbildung 13 für Ottokraftstoff). Als zusätzliche technische Variante im Jahr 2020 wird für die fossilen Kraftstoffe ein verbrauchsoptimierter Konzepthybrid-PKW betrachtet (Definition s. Kap. VI.2.1). Diese Variante wurde gewählt, um aufzuzeigen, welche Minderungen bei maximaler technischer Optimierungen auf der Fahrzeugseite erreicht werden können. Bei Einsatz eines solchen auf minimalen Verbrauch hin optimierten PKWs kann die Minderung der Treibhausgasemissionen noch einmal um 25 Prozent gesteigert werden. Gegenüber dem Durchschnitts-PKW 2020 (Neuzulassung) können mit diesem verbrauchsoptimierten Konzept-PKW die Emissionen der Treibhausgase um etwa 34 Prozent gemindert werden. Die so erzielte Verbrauchs- und THG-Minderung lässt sich auf die Biokraftstoffoptionen übertragen und ist hier nur aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in die Abbildungen miteingefügt worden.

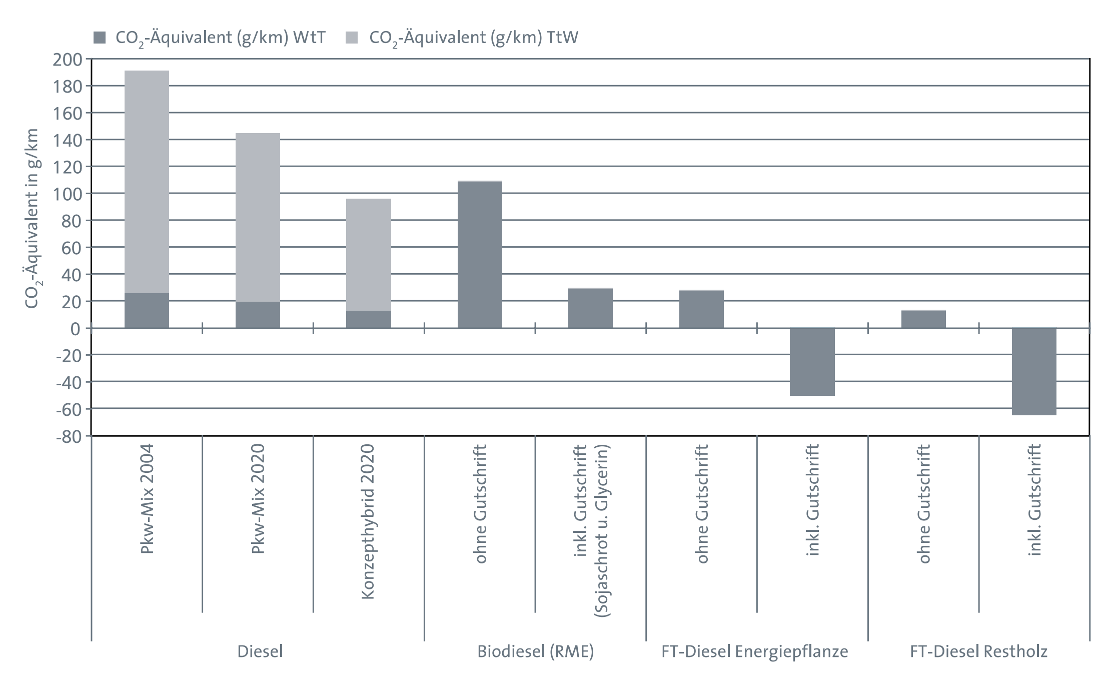
Durch die im Trendszenario unterstellte Effizienzverbesserung der PKW und aufgrund von Lernkurveneffekten bei der Herstellung von Biokraftstoffen sind auch die Treibhausgasemissionen der WtW-Betrachtungen bei Nutzung von Biokraftstoffen der ersten Generation im Jahr 2020 niedriger als im Jahr 2010.

Besonders günstig schneiden die Biokraftstoffe der sog. zweiten Generation ab, die sich momentan noch in der Entwicklungsphase befinden, 2020 aber voraussichtlich einen Beitrag zum Kraftstoffmarkt in Deutschland leisten werden. Mit diesen Kraftstoffen sind Minderungen der Treibhausgasemissionen von über 80 Prozent gegenüber den fossilen Energieträgern möglich. Auffällig ist hier, dass ein PKW mit FT-Diesel (bei Anrechnung der Koppelprodukte) negative Treibhausgasemissionen aufweist. Begründet ist dies mit dem großen Stromüberschuss, der bei der Herstellung des FT-Diesels anfällt und der bei der Bilanzierung gutgeschrieben werden kann. Auch im Jahr 2020 erscheint Biogas verschiedener Herstellungspfade unter Aspekten der Treibhausgasminderung mit Minderungen im Bereich von 65–90 Prozent gegenüber Erdgas interessant.

Auf EU-Ebene wird ein Anteil von Wasserstoff am Kraftstoffverbrauch im Jahr 2020 in Höhe von 5 Prozent diskutiert (EU-Kommission 2001). In HLG (2003) ist von einem Anteil von 5 Prozent Brennstoffzellenfahrzeugen an den Neuzulassungen in 2020 die Rede. In Abbildung 14 sind WtW-Bilanzierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge mit verschiedenen Pfaden zur Herstellung von Wasserstoff dargestellt. Die Datengrundlage der Vorkette (WtT) bilden CONCAWE (2003) bzw. ISI (2003).

Abbildung 12

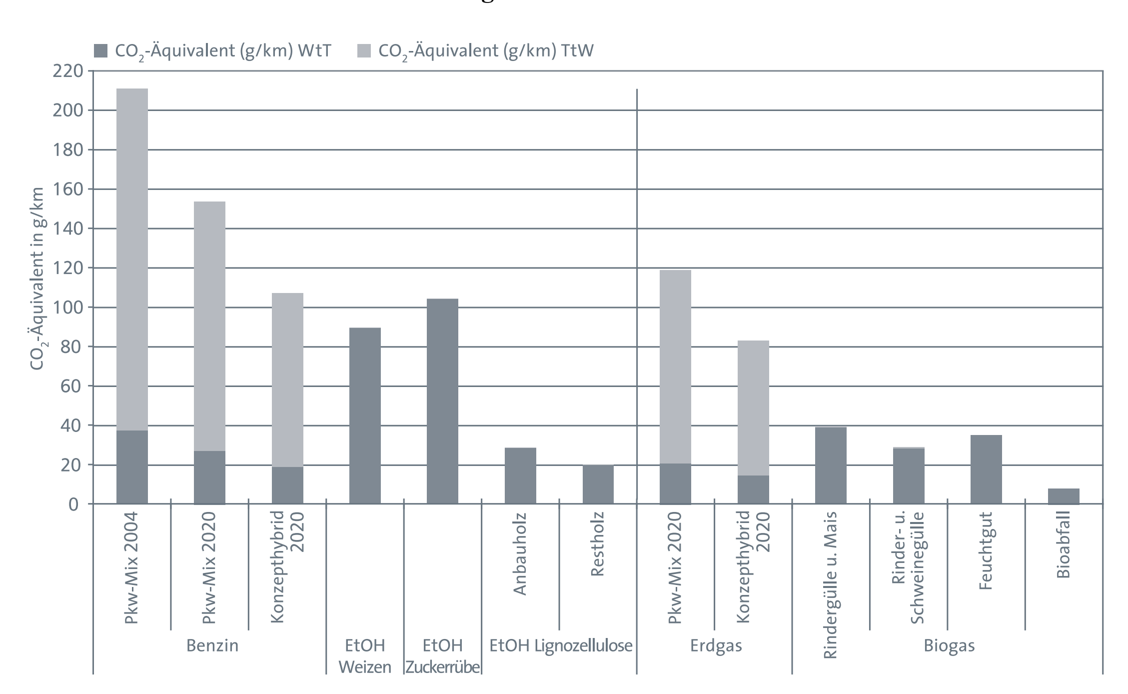
WtW-Darstellung für PKW mit Dieselmotor 2020



Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Abbildung 13

WtW-Darstellung für PKW mit Ottomotor 2020



Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

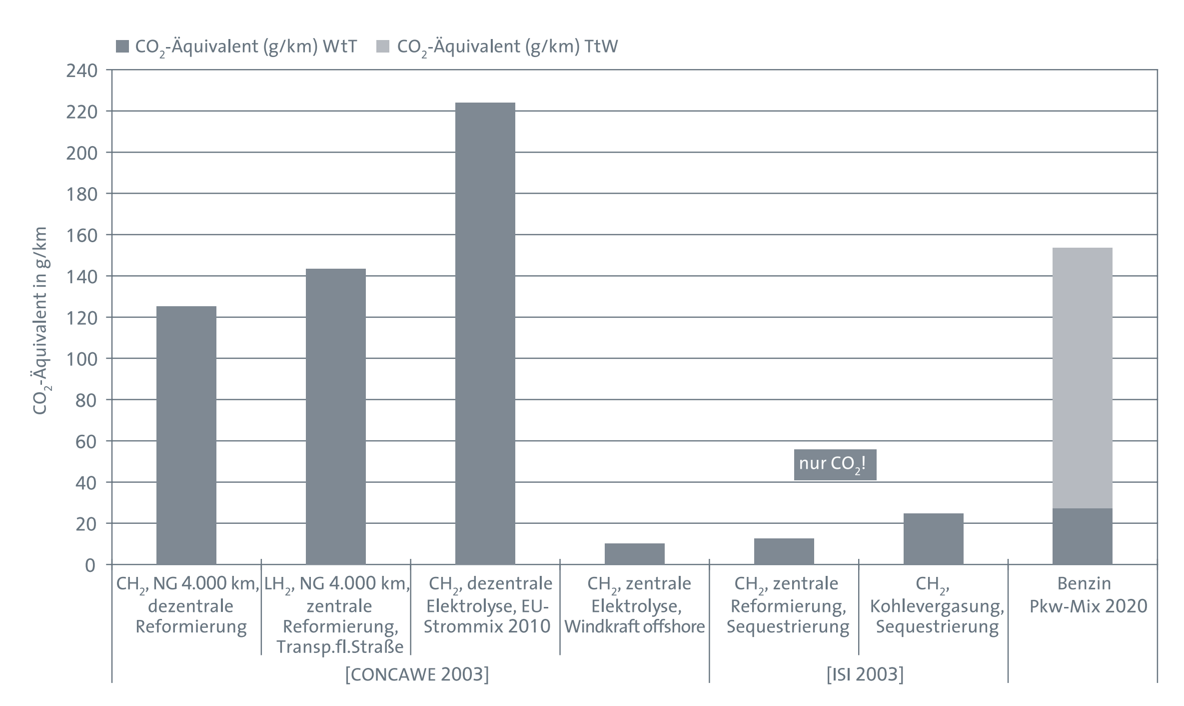
Zwei Beispiele für die Reformierung von Erdgas, das über eine Strecke von 4 000 km transportiert wurde, sind exemplarisch ausgewählt worden. Einmal wird Wasserstoff in komprimierter Form dezentral hergestellt, als zweite Variante wird Wasserstoff zentral produziert, verflüssigt und über die Straße zu den Tankstellen transportiert. Deutlich wird, dass – aufgrund der hohen Emissionen in der Kraftstoffvorkette – aus Erdgas bereitgestellter Wasserstoff keinen signifikanten Treibhausgasvorteil gegenüber dem direkten Einsatz von Erdgas hat.

Wird Wasserstoff über Elektrolyse auf der Basis des europäischen Strommixes im Jahr 2010 erzeugt und dann in Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt, so fällt die Bilanz gegenüber der Nutzung von fossilen Kraftstoffen und konventionellen Verbrennungsmotoren eindeutig negativ aus. Wird der Wasserstoff dagegen aus regenerativem Strom per Elektrolyse hergestellt, so hat er vergleichsweise niedrige Treibhausgasemissionen. Hier ist jedoch zu beachten, wie weiter unten ausgeführt, dass die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom zum Antrieb von Fahrzeugen in Konkurrenz zur Nutzung im stationären Sektor steht.

Falls die CO_2-Sequestrierung technisch so weit optimiert werden kann, dass sie auch unter ökonomischen Gesichtspunkten konkurrenzfähig ist, und ausreichend Speicherkapazitäten für die Deponierung zur Verfügung stehen, so können auch die Wasserstoffpfade „Reformierung von Erdgas“ und „Kohlevergasung“ für die Erreichung von Klimaschutzzielen im Verkehrsbereich interessant werden.

Abbildung 14

WtW-Darstellung für PKW mit Brennstoffzellenantrieb



Basiert auf dem Fahrzeugpark 2020 in Deutschland und den Kraftstoffvorketten der EU-15 in 2010.
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

4. Vergleich mit weiteren Studien

Die hier durchgeführten WtW-Betrachtungen weisen zum Teil Unterschiede zu anderen verfügbaren WtW-Studien bzw. Metaanalysen auf. Um potenzielle Differenzen, die beispielsweise auf eine unterschiedliche regionale Abgrenzung der Analysen zurückzuführen sind, zu identifizieren, wurden folgende aktuelle kraftstoffübergreifende Studien ausgewertet und mit den Ergebnissen der im vorstehenden Kapitel VI.3 durchgeführten WtW-Betrachtung verglichen:

– Kraftstoffmatrix 2004: Für die Jahre 2010 und 2020 werden für die Kraftstoffpfade Treibhausgasemissionen angegeben, die in Deutschland voraussichtlich einen nennenswerten Anteil am Kraftstoffverbrauch haben werden. Die Daten basieren auf CONCAWE (2004), jedoch wird die Übertragung auf den deutschen Raum – wie beispielsweise ein möglicherweise an Deutschland angepasster Strommix – aus dem Bericht nicht deutlich. Der zugrunde gelegte PKW entspricht einem Fahrzeug der Golfklasse ohne Partikelfilter.

– CONCAWE 2004: Mit dem Zeithorizont 2010 wird eine Vielzahl von Kombinationen aus konventionellen und alternativen Antrieben und Kraftstoffen für die EU-15 betrachtet. Der den WtW-Daten zugrunde gelegte Fahrzeugtyp ist ein PKW der Golfklasse. Im Rahmen dieser Studie werden nur die Daten von Diesel-PKW mit Partikelfilter betrachtet, da davon auszugehen ist, dass spätestens im Jahr 2010 jedes neu zugelassene Fahrzeug mit dieser Abgasnachbehandlungstechnologie ausgestattet sein wird.

– CONCAWE 2005: Hier handelt es sich um das Update der Studie CONCAWE (2004). Zum Redaktionsschluss des TAB-Berichts lagen die WtT- und TtW-Studien mit den detaillierten Erläuterungen und Daten noch nicht vor. Zu Vergleichszwecken und für eine erste Einschätzung, ob sich signifikante Neuerungen gegenüber der ersten Studie ergeben haben, sind die Daten von CONCAWE (2005) mit in die Tabelle 48 aufgenommen, eine tiefer gehende Auswertung kann jedoch auf Basis des derzeitigen Informationsstandes nicht vorgenommen werden.

– VIEWLS 2005: In dieser Zusammenstellung von Studien werden WtW-Betrachtungen für den Zeitraum vor und nach 2010 zur Verfügung gestellt. Die geografische Abgrenzung und das Referenzfahrzeug werden nicht weiter definiert. Ergebnis sind große Bandbreiten, die durch die unterschiedlichen Systemgrenzen der ausgewerteten Studien zustande kommen. Diese WtW-Daten werden hier nicht explizit mit in die nachfolgende Tabelle aufgenommen, da eine detaillierte Diskussion aufgrund der verschiedenen fehlenden Parameter nicht möglich ist. Ein erster Vergleich mit der in diesem Gutachten durchgeführten WtW-Betrachtung hat aber gezeigt, dass die im vorliegenden Bericht dargestellten Ergebnisse innerhalb der Bandbreiten der in VIEWLS durchgeführten Auswertung liegen.

– Kolke 2004: In dieser Studie werden verschiedene alternative Antriebe und Kraftstoffe betrachtet. Hierbei mit einbezogen werden nicht nur die Kraftstoffherstellung und Nutzung, sondern es wird eine komplette Lebensweganalyse durchgeführt, die auch die Fahrzeugherstellung mit einbezieht. Daher können die Ergebnisse von Kolke (2004) im Rahmen dieses Berichts nicht vergleichend mit herangezogen werden, da hier nur eine kraftstoffbezogene WtW-Betrachtung durchgeführt wurde.

– GM 2005: In dieser Studie werden WtW-Analysen zu einer Reihe alternativer Antrieb und Kraftstoffe durchgeführt. Fokussiert wird hier jedoch auf den US-amerikanischen Raum, was unter anderem bedeutet, dass das zugrunde gelegte Referenzfahrzeug (ein Pick-up) nicht repräsentativ für den deutschen Raum ist. Ein Vergleich dieser Studie mit deutschen und auch mit europäischen Studien von WtW-Analysen ist damit nicht sinnvoll.

In der folgenden Tabelle 48 sind die Ergebnisse der WtW-Bilanzierung vergleichbarer Studien bezüglich der Treibhausgasemissionen für 2010 und 2020 aufgeführt.

Betrachtet man die WtW-Ergebnisse der konventionellen fossilen Kraftstoffe der Kraftstoffmatrix und von CONCAWE (2004), so liegen deren Treibhausgasemissionen unterhalb der Ergebnisse dieser Studie. Begründet ist dies unter anderem darin, dass in CONCAWE (2004) und damit auch in der Kraftstoffmatrix der Verbrauch und die Emissionen für den Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) modelliert werden. Basis von TREMOD sind hingegen Verbräuche und Emissionen, die den realen Fahrzuständen im Alltagsbetrieb der Fahrzeuge angepasst sind, basierend auf dem Kraftstoffabsatz in Deutschland und dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (INFRAS 2004). Diese liegen in der Regel über den Angaben, die im Typprüfzyklus, also dem NEFZ, ermittelt werden.

Ein weiterer Unterschied ist, dass das bei CONCAWE (2004) und somit auch bei der Kraftstoffmatrix auch für Diesel-PKW die Golfklasse als Referenzfahrzeug dient. Der Verbrauch im Jahr 2004 liegt bei 205 MJ je 100 km. Hier wird jedoch ein Durchschnitts-PKW für das jeweilige Jahr verwendet. Dieser „Mix-PKW“ ist bei Dieselfahrzeugen deutlich größer mit einem Verbrauch von 223 MJ pro 100 km.

Aus diesen unterschiedlichen Energieverbräuchen als Voraussetzung für die WtW-Betrachtung resultieren dann auch unterschiedliche Emissionen für die Gesamtbetrachtung WtW. Weitere Differenzen liegen – wie bereits in Kapitel V.2 eingehend beschrieben – bei den Biokraftstoffvorketten vor allem aufgrund von unterschiedlicher Bilanzierung der anfallenden Koppelprodukte und den Annahmen zur landwirtschaftlichen Produktion. Die dadurch entstehenden Bandbreiten bei den Treibhausgasemissionen der verschiedenen Biokraftstoffoptionen sind in den ausgewerteten Studien jedoch im Rahmen der Analysegenauigkeit gut mit den in dieser Studie ermittelten WtW-Ergebnissen vergleichbar. Nur der Pfad

Tabelle 48

Zusammenstellung der Treibhausgasemissionen WtW verschiedener Publikationen für die Jahre 2010 und 2020

Kraftstoff		Antriebstechnik	TAB-Studie 2010	Kraftstoffmatrix 2010	CONCAWE 2010	CONCAWE update 2010	TAB-Studie 2020	Kraftstoffmatrix 2020
			CO_2-Äquivalent (g/km) WtW					
Dieselmotor								
Diesel	Diesel 2002/2004	konventionell/Mix	191	165	164	164	191	165
	Diesel	konventionell/Mix	165	125–160	159	156	145	125–160
	Diesel	Konzepthybrid/Hybrid	96	–	131	129	96	
Biodiesel	Raps	konventionell/Mix	35–126	–	90–99	73–83	30–109	50–100
FT-Diesel	Energiepflanzen, Anbauholz	konventionell/Mix	(- 54)–32	–	20	15	(- 49)–28	20
FT-Diesel	Restholz	konventionell/Mix	(- 71)–15	–	15	10	(- 65)–13	15
DME	Energiepflanzen, Anbauholz	konventionell/Mix			14	14		
DME	Restholz	konventionell/Mix			9	10		
Ottomotor								
Benzin	Benzin 2002	konventionell/Mix	211	185–195	183–196	183–196	211	185–195
	Benzin	konventionell/Mix	181	140–165	162–164	162–164	154	140–165
	Benzin	Konzepthybrid/Hybrid	107	–	140–141	140–141	107	
Ethanol	Getreidekörner	konventionell/Mix	105	–	143	32–178	90	125–145
Ethanol	Zuckerrübe	konventionell/Mix	123	–	55–110	58–111	105	50–110
Ethanol	Energiepflanzen	konventionell/Mix	42	–	42	43	29	35–40
Ethanol	Restholz	konventionell/Mix	34	–	34	36	20	30–35
Erdgas	Erdgas	konventionell/Mix	139	95–155	138 (4.000 km)	134	119	95–155
Biogas	Energiepflanzen, SNG	konventionell/Mix	36–47	–	–	5	36–40	15
	Reststoffe	konventionell/Mix	11–36	–	–	32	9–40	5

noch Tabelle 48

Kraftstoff		Antriebstechnik	TAB-Studie 2010	Kraftstoffmatrix 2010	CONCAWE 2010	CONCAWE update 2010	TAB-Studie 2020	Kraftstoffmatrix 2020
			CO₂-Äquivalent (g/km) WtW					
Brennstoffzelle								
H_2	CH_2, dez. Elektrolyse, EU-Strommix 2010	Brennstoffzelle			196	196	224	
	CH_2, NG, dez. Ref. 2010	Brennstoffzelle		–	105	104	125	85–225
	LH_2, zen. Ref., Transp. fl. Straße, 2010	Brennstoffzelle		–	120	119	143	105–240
	CH_2 zen. Elektrolyse, Windkraft offshore 2010	Brennstoffzelle		–	9	9	10	(10)–20

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Bioethanol auf Basis von Weizenkörnern liegt bei den Treibhausgasemissionen unterhalb der Ergebnisse von CONCAWE (2004), was auf die unterschiedliche Berücksichtigung der Koppelprodukte zurückzuführen ist.

Der Vergleich mit anderen WtW-Studien ähnlicher regionaler und zeitlicher Abgrenzung zeigt, dass die hier dargestellten Ergebnisse der WtW-Bilanzierung recht robust gegenüber leicht differierenden Annahmen (wie z. B. unterschiedliche Referenzfahrzeuge sowie Anrechnung von Koppelprodukten) sind.

5. Kraftstoffbedarf und Treibhausgasemissionen WtW

5.1 Vorgehen

Um von den spezifischen Minderungspotenzialen der WtW-Analysen auf die Gesamtpotenziale der alternativen Kraftstoff-, Fahrzeug- und Antriebstechnologien schließen zu können, wird ein Referenzszenario des Kraftstoffbedarfs für die Bezugsjahre 2004, 2010 und 2020 mit dem Modell TREMOD berechnet. Dieses beruht auf der zu erwartenden Entwicklung der Verkehrsnachfrage und des Fahrzeugparks sowie den in Kapitel VI.2 abgeleiteten Annahmen zur Effizienzentwicklung bei konventionellen Fahrzeugen mit Otto- und Dieselantrieb und den in Kapitel VI.1 dargestellten Annahmen zu den energetischen Vorketten. Andere Kraftstoffe und Antriebsenergien werden dabei zunächst noch nicht berücksichtigt.

5.2 Annahmen für das Referenzszenario

Im Einzelnen wurden für das Referenzszenario die folgenden Annahmen getroffen:

- Es werden das Basisjahr 2004 und im Szenario die Jahre 2010 und 2020 betrachtet.
- Die Fahrzeugbestände, Fahr- und Verkehrsleistungen werden entsprechend dem aktuellen TREMOD-Basisszenario angesetzt (TREMOD 4.0, Stand November 2005; IFEU 2005c). Die wichtigsten Randbedingungen sind:
  - Der Anteil der Diesel-PKW an den Neuzulassungen steigt bis 2010 auf 50 Prozent, und bleibt danach konstant. Der Anteil der Größenklassen entspricht dem Trend der vergangenen Jahre.
  - Die Fahrleistungen der PKW steigen von 588 Mrd. km (2004) auf 609 Mrd. km (2010) bzw. 661 Mrd. km (2020).
  - Die Transportleistungen des Straßengüterverkehrs steigen von 380 Mrd. tkm (2004) auf 437 Mrd. tkm (2010) bzw. 540 Mrd. tkm (2020).
- Die Entwicklung der Energieeffizienz neuer Fahrzeuge entspricht den folgenden Annahmen:
  - PKW entsprechend den Analysen in Kapitel VI.2
  - Übrige Fahrzeugkategorien: wie im TREMOD-Basisszenario

Gegenüber dem TREMOD-Basisszenario ergeben sich etwas höhere Energieverbräuche: Bezogen auf den gesamten Straßenverkehr beträgt der Unterschied 1,5 Prozent im Jahr 2010, 5 Prozent im Jahr 2020. Dies ist dadurch begründet, dass im TREMOD-Basisszenario die notwendige Effizienzsteigerung aufgrund der politischen Vorgaben (ACEA-Selbstverpflichtung) festgelegt wurde, während im hier berechneten Szenario die Wirksamkeit der technischen Maßnahmen entsprechend den Annahmen in Kapitel VI.2 direkt quantitativ umgesetzt wurden.

5.3 Ergebnisse Referenzszenario

Mit den dargestellten Annahmen wurde der Energiebedarf (TtW) mit TREMOD berechnet. In einem zweiten Schritt wurden darauf aufbauend die CO_2-Äquivalente der gesamten Kraftstoffkette (WtW) abgeleitet. Die Berechnung des TtW-Abschnitts wurde mit TREMOD unter Berücksichtigung des Treibhauspotenzials von CH_4 und N_2O und den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten CO_2-Emissionsfaktoren nach CONCAWE (2003) durchgeführt. Die Berechnung des WtT-Abschnitts erfolgte mit den in Kapitel VI.1 dargestellten kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren. Wie schon eingangs erwähnt, basieren die im Folgenden dargestellten Ergebnisse auf der Annahme, dass im Straßenverkehr ausschließlich konventionelle Otto- und Dieselkraftstoffe eingesetzt werden.

Kraftstoffbedarf

Die Ergebnisse für den Kraftstoffbedarf im Referenzszenario gehen aus der folgenden Tabelle 49 hervor.

Folgende wesentliche Entwicklungen lassen sich festhalten:

– Der Energiebedarf im Straßenverkehr nimmt gegenüber 2004 um 2,5 Prozent (2010) bzw. 7,2 Prozent (2020) ab. Während beim PKW eine Abnahme um 8 Prozent bzw. 19 Prozent zu beobachten ist, nimmt der Güterverkehr bis 2010 leicht zu, danach leicht ab.

Tabelle 49

Ergebnisse Kraftstoffbedarf im Referenzszenario (TtW)

Fz-Kat.	Energie	PJ 2004	PJ 2010	PJ 2020	Struktur (%) 2004	Struktur (%) 2010	Struktur (%) 2020
Referenzszenario – Kraftstoffbedarf nach Fahrzeugkategorien							
BUS	D	49	47	44	*2*	*2*	*2*
LNF	B	11	6	3	*0*	*0*	*0*
LNF	D	114	118	106	*5*	*5*	*5*
MZR	B	21	24	30	*1*	*1*	*1*
PKW	B	1.034	765	560	*46*	*35*	*27*
PKW	D	449	629	744	*20*	*29*	*36*
SNF	D	548	583	582	*25*	*27*	*28*
Summe		2.226	2.171	2.069	*100*	*100*	*100*
Referenzszenario – Kraftstoffbedarf nach Verkehrsarten							
PV	B	1.055	788	589	*99*	*99*	*99*
GV	B	11	6	3	*1*	*1*	*1*
PV	D	498	676	788	*43*	*49*	*53*
GV	D	662	700	688	*57*	*51*	*47*
alle	B	1.066	795	592	*48*	*37*	*29*
alle	D	1.160	1.377	1.476	*52*	*63*	*71*

LNF: LKW ≤ 3,5 t zul. Gesamtgewicht; MZR: motorisierte Zweiräder; SNF: LKW, Last- und Sattelzüge > 3,5 t zul. Gesamtgewicht, PV: Personenverkehr; GV: Güterverkehr; B: Benzin, Ottokraftstoff; D: Dieselkraftstoff
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

– Die Anteile der Fahrzeugarten am Energieverbrauch entwickeln sich wie folgt: Die PKW dominieren mit 67 Prozent (2004) bzw. 63 Prozent (2020), gefolgt von schweren Nutzfahrzeugen mit 25 Prozent (2004), zunehmend auf 28 Prozent (2020); leichte Nutzfahrzeuge haben in allen Jahren einen Anteil von 5 Prozent, motorisierte Zweiräder und Busse zusammen 2 Prozent.
– Der Anteil der Kraftstoffarten verschiebt sich deutlich hin zu Diesel: Das Verhältnis Otto/Diesel ändert sich von 48/52 (2004) auf 29/71 (2020).

Eine ähnliche Gesamtentwicklung des straßenverkehrsbedingten Energiebedarfs in den Jahren 2010 und 2020 wurde auch in der im Sommer 2005 publizierten Energiewirtschaftlichen Referenzprognose der Institute EWI und Prognos prognostiziert (EWI/Prognos 2005). Allerdings überlagern sich bei diesem Ergebnis gegenläufige Annahmen: EWI/Prognos schätzen die fahrzeugtechnischen Minderungen als geringer ein, gehen aber von einem geringeren Anstieg der Verkehrsleistungen aus als im hier berechneten Referenzszenario bzw. im TREMOD-Basisszenario.

Treibhausgasemissionen

Die Ergebnisse der CO_2-Berechnung sind in Tabelle 50 sowie in Abbildung 15 dargestellt. Wie zu erwarten, dominiert im Referenzszenario beim ausschließlichen Einsatz konventioneller Kraftstoffe der Anteil des TtW-Abschnitts mit rund 83 Prozent bei Dieselkraftstoff und 79 Prozent bei Ottokraftstoff. Insgesamt nimmt das Treibhauspotenzial aus dem Straßenverkehr von 2004 bis 2020 um 9 Prozent und damit etwas stärker als der Kraftstoffbedarf ab. Gründe dafür sind die leichten spezifischen Minderungen im WtT-Abschnitt sowie die Zunahme des Dieselanteils mit seinen auch für die Zukunft unterstellten etwas geringeren spezifischen WtT-Emissionen.

Tabelle 50

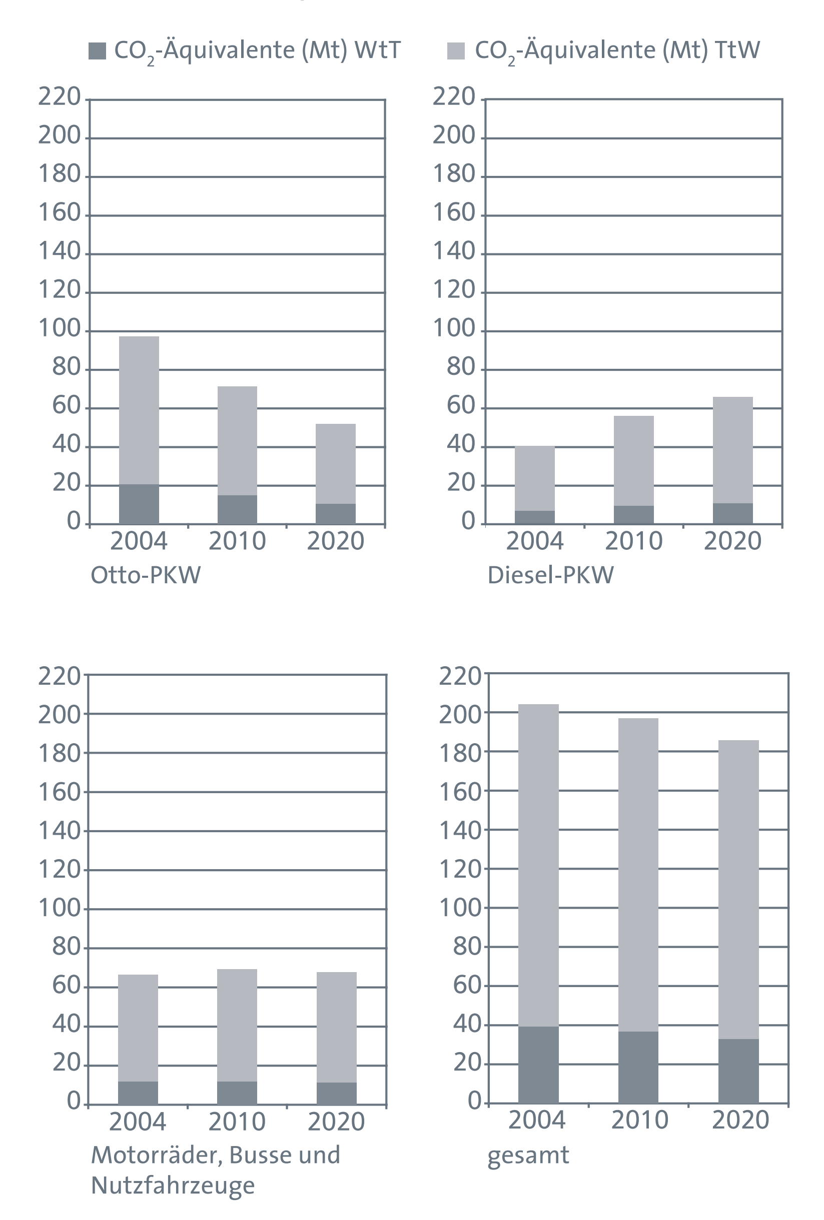
Ergebnisse CO_2-Äquivalente im Referenzszenario

		WtT			TtW			WtW		
		2004	2010	2020	2004	2010	2020	2004	2010	2020
Referenzszenario – CO_2-Äquivalente (Mt) nach Fahrzeugkategorien										
BUS	D	0,8	0,7	0,7	3,6	3,5	3,3	4,3	4,2	3,9
LNF	B	0,2	0,1	0,1	0,8	0,5	0,2	1,0	0,6	0,3
LNF	D	1,8	1,8	1,6	8,4	8,7	7,9	10,2	10,5	9,4
MZR	B	0,4	0,5	0,6	1,6	1,8	2,2	2,0	2,2	2,8
PKW	B	20,7	15,1	10,6	76,7	56,4	41,2	97,3	71,4	51,8
PKW	D	7,0	9,7	10,9	33,2	46,6	55,1	40,2	56,2	66,0
SNF	D	8,6	8,9	8,6	40,3	42,9	42,8	48,9	51,8	51,4
Summe		39,5	36,8	32,9	164,6	160,2	152,6	204,0	197,0	185,6
Referenzszenario – CO_2-Äquivalente (Mt) nach Verkehrsarten										
PV	B	21,1	15,5	11,2	78,3	58,2	43,4	99,4	73,7	54,6
GV	B	0,2	0,1	0,1	0,8	0,5	0,2	1,0	0,6	0,3
PV	D	7,8	10,4	11,6	36,8	50,0	58,4	44,6	60,4	69,9
GV	D	10,4	10,7	10,1	48,8	51,5	50,7	59,1	62,3	60,8
alle	B	21,3	15,6	11,3	79,1	58,6	43,6	100,4	74,3	54,9
alle	D	18,1	21,1	21,7	85,5	101,6	109,0	103,7	122,7	130,7

LNF: LKW ≤ 3,5 t zul. Gesamtgewicht; MZR: motorisierte Zweiräder; SNF: LKW, Last- und Sattelzüge > 3,5 t zul. Gesamtgewicht, PV: Personenverkehr; GV: Güterverkehr; B: Benzin, Ottokraftstoff; D: Dieselkraftstoff
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Abbildung 15

WtW-Ergebnisse im Referenzszenario



Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

VII. Biokraftstoffe – Mengenpotenzial und Flächenbedarf

Welche Menge von Biokraftstoffen kann auf der vorhandenen Fläche hergestellt werden? Diese Frage ist – neben der technologischen Einsatzreife, den spezifischen Emissionsminderungspotenzialen und den Kosten von Biokraftstoffen – zur Gesamtbewertung ihrer Relevanz für die Substitution fossiler Kraftstoffe und das Erreichen von Klimaschutzzielen von entscheidender Bedeutung. Die hier wiedergegebenen Berechnungen und Szenarien stammen aus dem Gutachten Öko-Institut/IFEU (2006).

Aus dem Well-to-Wheels-Szenario in Kapitel VI ergibt sich für die Jahre 2010 und 2020 der Kraftstoffbedarf für den Personenverkehr jeweils getrennt für Otto- und Dieselkraftstoff (Tabelle 51).

Ausgehend von dieser Basisprojektion werden im Folgenden mithilfe einiger Szenarien die Flächenbedarfe berechnet, die sich bei der Substitution einer bestimmten Menge fossiler Kraftstoffe ergeben. Zusätzlich wird die dadurch erzielbare Treibhausgasminderung ausgewiesen. Diese Szenarien orientieren sich an den Zielen der EU-Strategie für Biokraftstoffe (EU-Kommission 2006) von 5,75 Prozent in 2010 sowie am darüber hinaus aktuell diskutierten EU-Ziel von 10 Prozent in 2020. Für Biogas werden als Referenz die EU-Ziele für Erdgas herangezogen: 4 Prozent in 2010 und 10 Prozent in 2020.

Tabelle 51

Kraftstoffbedarf des PKW-Verkehrs in Deutschland für die Jahre 2010 und 2020

Szenario TAB-Referenz	2010 Kraftstoffbedarf PKW in PJ	2020 Kraftstoffbedarf PKW in PJ
PKW Benzin	765	560
PKW Diesel	629	744
Summe	1.394	1.304

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

1. Flächenbedarf von Biokraftstoffen

Ausgangsbasis der Berechnungen sind die flächenbezogenen Nettoerträge einzelner Biokraftstoffe für die Jahre 2010 und 2020 (Tabelle 52). Diese beinhalten den landwirtschaftlichen Ertrag und die Wirkungsgrade der einzelnen Herstellungsverfahren einschließlich Steigerungen aufgrund von Lernkurveneffekten.

Wird die Biomasse ökologisch angebaut, das heißt vor allem ohne Einsatz von synthetischen Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln, so sinken die Erträge gegenüber dem konventionellen Anbau erheblich. Exemplarisch angegeben sind die Nettoerträge von Ökoweizen. Diese betragen nur etwa ein Drittel des konventionell angebauten Weizens, da zusätzlich die Fruchtfolge mit einbezogen wird. Innerhalb von fünf Jahren werden die Erträge von drei Jahren für die Herstellung von Ethanol verwendet, die übrigen zwei Jahre dienen zur Gründüngung. Würde dagegen nur der Ertrag pro Jahr zwischen konventionell angebautem und ökologisch angebautem Weizen betrachtet, so läge der Unterschied bei dem Ertrag bei nur etwa 39 Prozent.

Der Nettoertrag von brasilianischem Bioethanol aus Zuckerrohr liegt vergleichsweise hoch, was mit den optimalen Anbaubedingungen und der effizienten Umwandlung von Zuckerrohr begründet ist. Der Wirkungsgrad bei der Herstellung ist bereits jetzt so weit ausgeschöpft, dass bis 2020 keine weitere Verbesserung bezogen auf 2010 zu erwarten ist.

Mit diesen Nettoerträgen kann nun die Fläche berechnet werden, die zur Erzeugung einer bestimmten Menge an Kraftstoff benötigt wird. Für 2010 wird hier zunächst ein Szenario betrachtet, das vom EU-Ziel von 5,75 Prozent Biokraftstoffen (hier bezogen auf den PKW-Verkehr) ausgeht. Unterstellt wird hierfür, dass der Biokraftstoffbedarf mit RME (substituiert Diesel) und Bioethanol auf Weizenbasis (substituiert Ottokraftstoff) realisiert würde. Der Flächenbedarf hierfür beträgt unter diesen Annahmen rund 1 Mio. ha (Tabelle 53). Die dadurch erzielbare Treibhausgasminderung liegt bei etwa 4 Mio. t pro Jahr.

Eine weitere Szenariorechnung zeigt auf, welche Menge an Treibhausgasemissionen eingespart werden kann, wenn 4 Prozent des Energiebedarfs des PKW-Sektors durch Erdgas ersetzt würden – auch hierbei handelt es sich um ein EU-Ziel. Des Weiteren wird der Flächenbedarf und das THG-Minderungspotenzial betrachtet, wenn es sich statt um Erdgas um Biogas aus Mais und Gülle handelte.

Tabelle 52

Flächenertrag von Biokraftstoffen (netto frei Fahrzeug)

	2010 GJ/ha	2020 GJ/ha	Anmerkung
BioEtOH Weizen	115	138	Rapsgutschrift berücksichtigt[a]
BioEtOH Weizen-öko	44	53	Rapsgutschrift berücksichtigt[a]
BioEtOH Zuckerrüben	117	128	
BioEtOH Zuckerrohr aus BR	125	125	
Biogas (Mais)	154	181	Gülleanteil berücksichtigt[b]
Biogas (Feuchtgut)	221	279	
RME-DE	54	62	
BtL-Holz-HS-KUP-DE	67	67	

a BioEtOH-Fermenter erhält Gutschrift für DDGS, Basis Rapskörner – daher muss der dafür von GEMIS allozierte Flächenbonus des Rapsanbaus herausgerechnet werden.
b Mais macht nur 63 Prozent des Energieinputs für Biogas aus, der Rest ist Gülle.
Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 53

Flächenbedarf und THG-Minderung bei Erfüllung des EU-Ziels von 5,75 Prozent Biokraftstoffen (RME und konv. EtOH) in 2010

	zu ersetzende Energie in PJ	Flächenbedarf in Mio. ha	THG-Minderung in Mio. t/a
PKW Benzin/EtOH Weizen	43,99	0,38	1,58
PKW Diesel/RME	36,17	0,67	2,41
Summe		1,06	4,00

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Beim Einsatz von 4 Prozent Erdgas liegen die THG-Minderungen bei knapp 0,7 Mio. t/a (Tabelle 54). Wird stattdessen methanreiches Biogas aus Mais und Gülle eingesetzt, belaufen sich die THG-Minderungen auf etwa 2 Mio. t/a bei einem Flächenbedarf von 0,2 Mio. ha (Tabelle 54).

Eine Maximalbetrachtung verdeutlicht, dass eine Fläche von über 18 Mio. ha benötigt würde, um den gesamten Kraftstoffbedarf des PKW-Sektors in 2010 durch konventionelle Biokraftstoffe (RME, Bioethanol aus Weizen) zu decken (Tabelle 55). Dies ist offensichtlich nicht zu realisieren. Als unter umweltpolitischen Restriktionen maximal verfügbare Anbaufläche für Energiepflanzen im Jahr 2010 werden beispielsweise im Nachhaltigkeitsszenario des Projekts „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ für den mobilen und stationären Sektor etwa 1,6 Mio. ha angegeben (Öko-Institut 2004b).

Für 2020 wird jeweils für konventionelle Biokraftstoffe der sog. zweiten Generation ein Szenario betrachtet, das aufzeigen soll, welche Fläche benötigt wird, um das vorläufige EU-Ziel von 10 Prozent Biokraftstoffanteil (auch hier bezogen auf den PKW-Verkehr) zu realisieren. Beim Einsatz von RME und Bioethanol auf Weizenbasis liegt der Flächenbedarf bei 1,6 Mio. ha, die Treibhausgasminderungen würden sich auf etwa 7 Mio. t/a belaufen (Tabelle 56).

Würde dieses EU-Ziel durch Biokraftstoffe der zweiten Generation realisiert, betrüge der Flächenbedarf zur Substitution von Dieselkraftstoff 1,1 Mio. ha, wenn BtL aus Holz von Kurzumtriebsplantagen zum Einsatz käme. Der Flächenbedarf von Bioethanol aus Lignozellulose kann hier nicht quantifiziert werden, da die notwendigen Daten nicht zur Verfügung stehen. Würden 10 Prozent des Kraftstoffbedarfs des PKW-Sektors in 2020 durch Kraftstoffe der zweiten Generation ersetzt werden, dann könn-

Tabelle 54

Flächenbedarf und THG-Minderung bei Erfüllung des EU-Ziels von 4 Prozent Erdgas in 2010

	zu ersetzende Energie in PJ	Flächenbedarf in Mio. ha	THG-Minderung in Mio. t/a
PKW Benzin/CNG	30,6	–	0,67
PKW Benzin/Biogas Gülle und Mais	30,6	0,20	2,02

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 55

Flächenbedarf und THG-Minderung in 2010 bei Deckung des gesamten Kraftstoffbedarfs des PKW-Sektors mit konventionellen Biokraftstoffen

alles Biokraftstoffe der ersten Generation (Maximalbetrachtung)	zu ersetzende Energie in PJ	Flächenbedarf in Mio. ha	THG-Minderung in Mio. t/a
PKW Benzin/EtOH Weizen	765	6,63	27,56
PKW Diesel/RME	629	11,7	41,198
Summe	1.397	18,36	69,54

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 56

Flächenbedarf und THG-Minderung bei Erfüllung des EU-Ziels von 10 Prozent in 2020 (konventionelle Biokraftstoffe)

Anteil Biokraftstoffe 10 % (RME und konv. EtOH)	zu ersetzende Energie in PJ	Flächenbedarf in Mio. ha	THG-Minderung in Mio. t/a
PKW Benzin/EtOH Weizen	55,7	0,40	2,01
PKW Diesel/RME	74,8	1,21	4,96
Summe		1,61	6,97

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

ten etwa 12,3 Mio. t Treibhausgasemissionen eingespart werden (Tabelle 57).

Eine weitere Szenariorechnung zeigt, welche THG-Emissionen eingespart werden können, wenn entsprechend des derzeit diskutierten EU-Ziels 10 Prozent des Energiebedarfs des PKW-Sektors im Jahr 2020 durch Erdgas ersetzt würde. Weiterhin wird der Flächenbedarf und das THG-Minderungspotenzial betrachtet, wenn es sich statt um Erdgas um Biogas aus Mais und Gülle handelt.

Die Substitution mit Erdgas würde eine THG-Einsparung von 1,2 Mio. t erbringen, beim Einsatz von Biogas aus Mais und Gülle läge das Minderungspotenzial bei 3,7 Mio. t, wobei ein Flächenbedarf in Höhe von 0,3 Mio. ha entstünde (Tabelle 58).

Tabelle 57

Flächenbedarf und THG-Minderung bei Erfüllung des EU-Ziels 10 Prozent in 2020 (Biokraftstoffe der zweiten Generation)

Anteil Biokraftstoffe 10 % FT-Diesel und EtOH der zweiten Generation	zu ersetzende Energie in PJ	Flächenbedarf in Mio. ha	THG-Minderung in Mio. t/a
PKW Benzin/EtOH LZ	55,7	?	3,81
PKW Diesel/FT-Diesel	74,8	1,12	8,51
KUP			
Summe		1,12	12,32

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Tabelle 58

Flächenbedarf und THG-Minderung bei Erfüllung des diskutierten EU-Ziels 10 Prozent Erdgas in 2020

Anteil methanreiches Gas 10 %	zu ersetzende Energie in PJ	Flächenbedarf in Mio. ha	THG-Minderung in Mio. t/a
PKW CNG	55,7	–	1,21
PKW Otto/Biogas	55,7	0,31	3,69

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

Die letzte Berechnung soll aufzeigen, wie viel Fläche benötigt würde, wenn der gesamte prognostizierte Dieselbedarf des PKW-Sektors in 2020 durch Biokraftstoffe der zweiten Generation (FT-Diesel auf Basis von Holz aus Kurzumtriebsplantagen) ersetzt würde.[27] Allein um den Dieselkraftstoffbedarf über synthetischen FT-Diesel zu decken, müssten 12 Mio. ha Anbaufläche zur Verfügung stehen (Tabelle 59).

Auch hier sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich um eine Maximalbetrachtung handelt, die nicht realistisch ist. Als Anbaufläche für Energiepflanzen im Jahr 2020 werden im Nachhaltigkeitsszenario des Projekts „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ insgesamt etwa 3,2 Mio. ha angegeben (Öko-Institut 2004b). Zusätzlich stehen noch biogene Reststoffe in Höhe von 646 PJ/a (Nachhaltigkeitsszenario 2020, Öko-Institut 2004b) zur Energiegewinnung zur Verfügung, aus denen Biokraftstoffe der zweiten Generation hergestellt werden könnten.

Die betrachteten Szenarien geben Auskunft über die benötigten Flächen, wenn ein bestimmter Anteil des Energiebedarfs des PKW-Sektors durch Biokraftstoffe ersetzt werden soll. Die entscheidende Frage ist jedoch, wie viel nutzbare Energie aus Biomasse überhaupt in den Jahren 2010 und 2020 zur Verfügung stehen kann und wie viel davon sinnvoller Weise im mobilen Sektor eingesetzt werden sollte. Dieser Fragestellung wird im Kapitel IX „Nutzungskonkurrenzen“ nachgegangen.

[27] Für Ethanol aus Lignozellulose ist diese Berechnung nicht möglich, da die Nettoerträge je Fläche nicht zur Verfügung stehen. Bei der Berechnung der THG-Minderungspotenziale ist dieser Biokraftstoff jedoch mit berücksichtigt worden.

Tabelle 59

Flächenbedarf und THG-Minderung im Jahr 2020 bei Deckung des gesamten Kraftstoffbedarfs des PKW-Sektors durch Biokraftstoffe der zweiten Generation

alles Biokraftstoffe der ersten Generation (Maximalbetrachtung)	zu ersetzende Energie in PJ	Flächenbedarf in Mio. ha	THG-Minderung in Mio. t/a
PKW Benzin/EtOH LZ	557	?	20,11
PKW Diesel/FT-Diesel KUP	748	12,08	49,58
Summe	1.305	12,08	69,69

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

2. Strombedarf für regenerativen Wasserstoff via Elektrolyse

Im TREMOD-Referenzszenario beträgt die PKW-Fahrleistung 661 Mrd. km im Jahr 2020. In der „Kraftstoffmatrix“ wird, basierend auf Überlegungen aus dem Projekt HyNet, davon ausgegangen, dass im Maximalfall 3 Prozent im Fahrzeugbestand durch Wasserstofffahrzeuge ersetzt werden können.

Unter der Annahme, dass Wasserstoff-PKW die gleiche Fahrleistung haben wie PKW mit konventionellem Antrieb, ergibt sich eine Fahrleistung von 19,83 Mrd. km in 2020, die von PKW mit Wasserstoffantrieb erbracht werden müssten. Hier wird davon ausgegangen, dass es sich bei diesen Fahrzeugen um PKW mit Brennstoffzellenantrieb handelt, also Wasserstoff nicht direkt in einem Verbrennungsmotor eingesetzt wird.[28]

Bei einem hier zugrunde gelegten Energiebedarf eines durchschnittlichen Brennstoffzellen-PKWs in 2020 in Höhe von 112 MJ/100 km muss eine Wasserstoffmenge von 22,2 PJ bereitgestellt werden. Wird dieser Wasserstoff auf Basis regenerativen Stroms per Elektrolyse erzeugt, entsteht bei einem Wirkungsgrad der Elektrolyse von 65 Prozent (CONCAWE 2003) ein Strombedarf für den mobilen Sektor in Höhe von 34 PJ. Die gesamte bundesdeutsche PKW-Fahrleistung entspräche demnach theoretisch einem Strombedarf von 1.133 PJ/a. Zum Vergleich: Die Bruttostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2004 betrug etwa 2.180 PJ, der bereitgestellte Strom aus Windkraft ca. 90 PJ (BMWA 2005). Übertragen auf die derzeitigen Mengen müsste also bereits etwas mehr als ein Drittel des aus Windkraft bereitgestellten Stroms aufgewendet werden, um 3 Prozent der PKW-Fahrleistung über mit Brennstoffzellen betriebene H_2-PKW zu ermöglichen.

3. Exkurs: Biokraftstoffe – Ertragssteigerungen durch Gentechnik?

Vielfach wird die Annahme geäußert, Gentechnik bzw. gentechnische Pflanzenzuchtansätze besäßen ein großes Potenzial zur Ertragssteigerung bei Energiepflanzen. Eine vertiefte Analyse dieser Fragestellung ist im Rahmen dieses Berichts nicht möglich. Eine fundierte Betrachtung müsste zum einen differenzieren nach der Art der Biokraftstoffe bzw. der verwendeten Ausgangspflanzen und -materialien, zum anderen nach der tatsächlichen Zielrichtung, entsprechend den drei Hauptzielen der Pflanzenzucht Ertragssteigerung (im eigentlichen Sinn), Ertragssicherung und Qualitätseigenschaften/Inhaltsstoffe (TAB 1998, S. 97).

[28] Zwar werden auch für Wasserstofffahrzeuge mit Verbrennungsmotor zum Teil erhebliche Wirkungsgradvorteile gegenüber Benzinfahrzeugen angegeben, die Kosten der Infrastruktur und der Speicheraufwand im Fahrzeug lassen Wasserstoff jedoch nur für extrem effiziente Verbraucher und damit primär für Brennstoffzellen sinnvoll erscheinen.

Ertragssteigerung

– Die Ertragsleistung von Pflanzen, sowohl einzelner Teile (Fruchtstände, Körner, Knollen, Wurzelkörper) als auch der Gesamtpflanze, wird als komplexes Merkmal multifaktoriell bestimmt und ist einer gentechnischen Beeinflussung bislang nicht zugänglich. Genorte mit starker Wirkung auf quantitative Merkmale, sog. QTL (Quantitative Trait Loci), werden bislang ganz überwiegend für eine „konventionelle“ Züchtung durch Verwendung entsprechender molekulargenetischer DNA-Marker genutzt (TAB 1998, S. 99). Das sog. „metabolic engineering“ zur Steuerung ganzer Stoffwechselwege befindet sich in eher frühen Forschungsstadien (TAB 2005a).

– Mit Blick auf die Ertragssteigerung bei bislang nicht oder kaum genutzten – also züchterisch nur wenig bearbeiteten – Pflanzen für die Biogas- oder BtL-Gewinnung, bei denen die Gesamtbiomasse den Ertrag definiert, muss berücksichtigt werden, dass bei ihnen wohl auf lange Zeit enorme Steigerungen durch das umfangreiche Repertoire der konventionellen Pflanzenzüchtung erzielt werden könn(t)en (TAB 2005b).

– Ähnliches dürfte in vielen Fällen gelten, wenn anstelle eines bisher verfolgten Teilertrages, z. B. der Maiskolben, der Gesamtertrag der Pflanze in den Fokus der züchterischen Bemühungen genommen wird. Ein eindrucksvolles Beispiel hierfür bietet der Energiemais der Firma KWS, bei dem der entscheidende Fortschritt durch die – konventionelle – Einkreuzung von Kurztaggenen aus südamerikanischen in europäische, kältetolerante Sorten gelang (z. B. Harling 2006).

Ertragssicherung

Die vielfältigsten Züchtungsbemühungen betreffen die Ertragssicherung, d. h. eine Verbesserung der Widerstandskraft der Pflanzen gegen ertrags- oder qualitätsmindernde Einwirkungen wie Krankheiten und Schädlinge oder Nährstoff- und Wassermangel. Entsprechende Resistenzen bzw. Toleranzen können zum Teil durch Einzelmerkmale (Gene bzw. Proteine) vermittelt werden und sind der Gentechnik daher zugänglich. Auf dem Markt befinden sich seit mittlerweile zehn Jahren insekten- und herbizidresistente gentechnische Sorten – und repräsentieren 99 Prozent der angebauten gentechnisch veränderte Pflanzen (GVP) (James 2005) –; daneben werden seit Längerem Virus- und Pilzresistenzen sowie Resistenzen bzw. Toleranzen gegen Kälte, Trockenheit oder Versalzung erforscht und entwickelt. Im engeren Sinn spezifisch für Energiepflanzen sind solche ertragssichernden Eigenschaften bzw. Züchtungsansätze nicht, aber sie betreffen natürlich potenziell auch diese. Zumindest für die EU gilt, dass die (z. B. gegenüber den USA vergleichsweise) strengen Sicherheitsauflagen für den Anbau von GVP das mögliche ökonomische Potenzial mit beeinflussen, weshalb konventionellen Pflanzen im Zweifelsfall der Vorzug gegeben werden dürfte.

Qualitätseigenschaften

Hierunter fällt das Zuchtziel einer Erhöhung der Gehalte einzelner Inhaltsstoffe, z. B. einzelner Fettsäuren oder von Stärkebestandteilen, was v. a. für die Biodiesel- oder Ethanolgewinnung von Bedeutung sein könnte. Grundsätzlich sind gentechnische Ansätze hierfür geeignet, wenn nur ein Gen – oder zumindest nur einige wenige – für die Produktion des gewünschten Stoffs verantwortlich ist. Allerdings haben sich die hochgesteckten Erwartungen an eine Ausbeuteerhöhung durch Gentechnik in den vergangenen Jahren nicht erfüllt (TAB 2005a), sodass vermehrt Möglichkeiten einer Doppel- bzw. Mehrfachnutzung ausgelotet werden, z. B. die gentechnische Gewinnung von „Biokunststoff“ und eine energetische Verwendung der Restpflanze (im großen Stil anvisiert durch das U.S. Department of Energy sowie die Firma Metabolix; Ausführliches hierzu in TAB 2005a, S. 163 ff.).

Der erste Zulassungsantrag für eine explizit für eine energetische Nutzung optimierte GVP wurde im Oktober 2005 in den USA sowie im März 2006 in der EU durch die Firma Syngenta gestellt (http://www.transgen.de). Hierbei handelt es sich um eine Maissorte, die ein gentechnisch übertragenes Enzym, eine thermostabile Alpha-Amylase, enthält, wodurch die Maisstärke ohne Zugabe weiterer Enzyme aufgeschlossen werden kann und die Ethanolherstellung erleichtert werden soll (TAB 2005a, S. 162 f.).

Für die Biokraftstoffgewinnung nutzbar wären möglicherweise auch Ansätze der gentechnischen Beeinflussung der Holz- und Fasereigenschaften von Gehölzen, die bisher für Zwecke der Papiergewinnung verfolgt wurden. Eine Kommerzialisierung transgener Bäume wird in Europa allerdings auf absehbare Zeit als wenig chancenreich eingeschätzt, weil aufgrund der besonderen risikorelevanten Eigenschaften (Langlebigkeit, hohes Verbreitungspotenzial) ein Zulassung unter dem geltenden EU-Recht schwer vorstellbar erscheint (TAB 2005a, S. 167 ff.).

VIII. Erweiterung der Ressourcenbasis durch Importe

Neben den endogenen (heimischen) Potenzialen zur Bereitstellung von Biomasse für die energetische Nutzung gibt es auch exogene Potenziale, die sich durch Importe von Bioenergieträgern (Brenn- und Kraftstoffe) realisieren lassen. Die folgende Diskussion stützt sich wesentlich auf die Darstellung in Öko-Institut/IFEU (2006).

Wesentlich ist dabei, dass unter Nachhaltigkeitsaspekten mögliche Exporte von Biokraftstoffen nicht zu Nachteilen für die Umwelt (z. B. Urwaldrodung, Umwandlung von extensiven Flächen zu Bioenergieplantagen) oder zu sozialen Problemen (z. B. Enteignung/Vertreibung) führen und die Nahrungsmittelsicherheit nicht nachteilig beeinflusst wird. Die beiden letztgenannten Aspekte sind insbesondere für Entwicklungs- und Schwellenländer relevant, der erste gilt global.

1. Importpotenziale aus Europa

In der Studie IE/BFH/UH/Öko 2006 wurde untersucht, wie groß die Möglichkeiten zum internationalen Handel mit Bioenergie – darunter Biokraftstoffe – in der EU-25 sind. Diese Arbeit zeigt – bestätigt von der unabhängig davon erstellten europäischen Potenzialanalyse für nachhaltige Bioenergie (Öko/Alterra/AEAT/EFI 2006) –, dass erhebliche und bislang ungenutzte Potenziale insbesondere in Polen und Rumänien liegen. Entsprechende Arbeiten wurden auch in VIEWLS (2005) durchgeführt, mit z. T. noch höheren Potenzialen und geringeren Kosten.[29]

In der Studie IE/BFH/UH/Öko (2006) wurden auch Kostenschätzungen und Stoffstromanalysen (auf Basis der Technologiedaten aus Öko-Institut 2004b) durchgeführt und durch Abschätzungen zum Logistikaufwand für Importe ergänzt. Diese Untersuchungen ergaben, dass für einige der Biokraftstoffe Importe aus Mittel- und Osteuropa inklusive des Transports wettbewerbsfähig sein können (Tabelle 60).

Bei RME ist kein nennenswerter Unterschied zu erwarten, jedoch bei Ethanol[30]0 und BtL-Kraftstoffen – Polen könnte hier fast zur Hälfte der Kosten anbieten, Rumänien und Ungarn könnten BtL aus Kurzumtrieb immer noch zu ca. 25 Prozent unter den deutschen Kosten bereitstellen.

Die THG-Bilanzen und die Emissionen von versauernden Luftschadstoffen wären für die importierten Biokraftstoffe aus östlichen EU-Staaten nicht schlechter als für die heimischen. Nur Rumänien wäre deutlich ungünstiger – aber Biokraftstoffe aus diesem Land würden immer noch eine hohe Einsparung gegenüber der Nutzung von fossilem Diesel erlauben.

---

29 Das VIEWLS-Projekt hat aufseiten der verfügbaren Flächen in den mittel- und osteuropäischen Staaten keine nennenswerten ökologischen Restriktionen berücksichtigt und relativ optimistische Annahmen zu den Gestehungskosten getroffen. Demgegenüber haben die o.g. neuen Studien für BMU und EEA vor allem den Ökolandbau und Naturschutzfragen berücksichtigt und die Kosten für Biokraftstoffe eher vorsichtig angesetzt.

30 Hier wurde Bioethanolproduktion der ersten Generation berücksichtigt, bei der nur Weizenkörner genutzt werden können. Mittelfristig würde sich – entsprechende technologische Fortentwicklung unterstellt – das Bild bei lignozellulotischem Bioethanol noch verbessern und sich die Potenziale erhöhen.

Tabelle 60

THG-Bilanzen (WtW) und Kosten für biogene Kraftstoffe in Deutschland im Vergleich zu möglichen Importen im Jahr 2010

Kraftstoff	Herkunftsland	$CO_{2äq}$ (g/$MJ_{Kraftstoff}$)	$SO_{2äq}$ (g/$MJ_{Kraftstoff}$)	Kosten (o. Steuern) (Euro/$GJ_{Kraftstoff}$)
Diesel		86,89	0,11	9,7
Benzin		91,39	0,08	14,4
RME	DE	18,33	0,28	21,4
RME	CZ	48,67	0,44	20,8
RME	PL	20,17	0,17	20,3
BioEtOH (Weizen)	DE	64,44	0,17	22,8
BioEtOH (Zuckerrübe)	DE	63,36	0,17	32,8
BioEtOH (Zuckerrohr)	BR	29,69	0,17	9,4
BioEtOH (Weizen)	CZ	58,56	0,17	11,4
BioEtOH (Weizen)	PL	59,03	0,17	9,2
BtL (Waldholz)	DE	- 36,44	0,17	14,2
BtL (KUP-Pappel)	DE	- 27,69	0,17	24,4
BtL (Holz-Wald)	CZ	- 36,36	0,17	14,2
BtL (KUP-Pappel)	CZ	- 22,39	0,17	16,4
BtL (Holz-Wald)	HU	- 37,28	0,17	15,8
BtL (KUP-Pappel)	HU	- 18,64	0,17	18,1
BtL (Holz-Wald)	PL	- 61,78	0,17	11,4
BtL (KUP-Weide)	PL	- 41,22	0,17	12,5
BtL (Holz-Wald)	RO	- 26,64	0,17	15,6
BtL (KUP-Pappel)	RO	- 5,36	0,17	17,5

Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006 auf Basis von IE/BFH/UH/Öko 2006

2. Importpotenziale aus Entwicklungsländern

Die heutigen Schwerpunkte der globalen Bioenergienutzung liegen in den Ländern Afrikas, Asiens und Lateinamerikas (Tabelle 61). In den dargestellten Primärenergiemengen sind jedoch – mit Ausnahme von Brasilien – bislang fast keine Biokraftstoffe enthalten, da die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit bei eher niedrigen Ölpreisen bislang nicht gegeben war.

Die künftigen globalen Potenziale zur Bereitstellung von Bioenergie sowohl aus Reststoffen wie auch durch Anbau werden sehr unterschiedlich eingeschätzt, wie Tabelle 62 zeigt. Der Grund hierfür liegt insbesondere in den

Tabelle 61

Globaler Energiebedarf im Jahr 2003 und regionale Anteile von Biomasse

	gesamte Primärenergie	regenerative gesamt	davon Biomasse	Anteil Biomasse an Primärenergie
Afrika	21,5	10,8	10,5	*49 %*
Lateinamerika	18,8	5,3	3,3	*18 %*
Asien	48,2	16,1	15,0	*31 %*
China	48,4	10,0	9,0	*19 %*
Naher Osten	16,3	0,1	0,0	*0 %*
GUS + MOE	43,7	1,7	0,6	*1 %*
OECD	223,3	12,7	6,8	*3 %*
Welt	420,3	56,7	45,2	*11 %*

Angaben in EJ/a
Quelle: Öko-Institut 2005b, basierend auf IEA-Daten

Tabelle 62

Globale Schätzungen zum Potenzial für Bioenergie

Publikation	betrachteter Zeitraum	Biomassepotenzial (EJ/a)			flüssige Biokraftstoffe (EJ/a)
		Anbau	Reststoffe	gesamt	
IPCC – TAR-Mitigation 2001	2050	440	N/A	440	154
	2100	310		310	109
Fischer/Schrattenholzer 2001	2050, niedrig	240	130	370	130
	2050, hoch	320	130	450	158
	2050	A/NR	A/NR	150	53
Yamamoto et al. 1999	2050	110	72	182	64
	2100	22	114	136	48
Moreira 2002	2100	1.301	N/A	1.301	455
Lightfoot/Green 2002	2100	268	N/A	268	94
Hoogwijk et al. 2003	2050, niedrig	0	33	33	12
	2050, hoch	1.054	76	1.130	396

Quelle: nach Moreira 2004

verschiedenen Annahmen zur Landverfügbarkeit und den erreichbaren Erträgen sowie Effizienzen der angenommenen Umwandlungstechnologien.

Im Rahmen der IPCC-Szenarien zum künftigen globalen Energiebedarf wurden mit dem „Weltmodell“ IMAGE 2.2 Abschätzungen auch zum langfristigen globalen Bioenergiepotenzial durchgeführt, die auch die Effekte künftiger Ertragssteigerungen der konventionellen Landwirtschaft, der Bevölkerungsentwicklung und der Bodendegradation sowie der Wasserverfügbarkeit einbezogen (MNP 2005).

Parallel hat der WBGU im Rahmen seiner „Globalen Energiewende“-Studie eine „ökologische Leitplanke“ für das globale Bioenergiepotenzial von ca. 100 EJ insgesamt gesetzt (vgl. WBGU 2003).

Als belastbare Untergrenze für das globale Bioenergiepotenzial kann daher eine Verdopplung des heutigen Primärenergiebeitrags von ca. 45 EJ/a angenommen werden; als Obergrenze sind Werte um 400 EJ möglich.[31] Die globalen Bioenergiepotenziale sind somit beachtlich und liegen aufgrund der klimatischen Bedingungen und der Flächenverfügbarkeit zu einem erheblichen Anteil – mindestens 50 Prozent – in heutigen Schwellen- und Entwicklungsländern.

[31] Dies entspräche fast dem heutigen gesamten Weltenergiebedarf. In den 400 EJ sind ca. 50 EJ an Bioenergie enthalten, die durch extensiven Anbau von mehrjährigen Energiepflanzen wie Jatropha auf Karstflächen möglich wären. Diese stünden aufgrund der relativ hohen Kosten und des dezentralen Anfalls kaum für Exporte zur Verfügung.

Die schon genannte Studie IE/BFH/UH/Öko (2006) hat sich auch der grundsätzlichen Frage gewidmet, ob es einen Zusammenhang zwischen möglichen Bioenergieimporten aus Entwicklungsländern und der Ernährungssicherheit gibt, und hierzu ein Expertengespräch durchgeführt. Nach den Ergebnissen ist ein direkter Zusammenhang nicht zu konstatieren. Auch die Welternährungsorganisation (FAO) sieht eher positive Effekte durch Biokraftstoffexporte, da der Handel mit Bioenergie als mögliche zusätzliche Einkommensquelle gilt (FAO 2005). Dies wird auch in anderen Arbeiten so bewertet (SEI 2005a u. b; UNCTAD 2005).

Dessen ungeachtet stellt sich aufgrund der in Entwicklungsländern tendenziell eher „schwachen“ Regulierung der Flächennutzung, von Konflikten um Eigentum an Boden und unzureichendem Schutz für die Entwicklungsbelange indigener Völker und marginaler (oft ländlicher) Teile der Bevölkerung die Frage, ob Stoffstrom- und Kostenbilanzen allein zur Beurteilung möglicher Biokraftstoffimporte aus diesen Ländern ausreichen. In einer Kurzstudie wurden erste Kriterien für die „Nachhaltigkeit“ von Biokraftstoffexporten aus Entwicklungsländern vorgelegt (Öko-Institut 2005b), die derzeit in einer Reihe von Fallstudien auf ihre regionale Anwendbarkeit hin überprüft werden (GTZ 2005a, b, c u. d).[32] Die ersten Ergebnisse unterstreichen, dass es nicht nur in Brasilien, sondern auch in Teilen Ostafrikas und Asiens durchaus

[32] Die Entwicklung von Kriterien für den Welthandel mit Bioenergie ist auch Teil einer laufenden Task der IEA zu Bioenergie (IEA 2005) und ist zur Aufnahme in die beim Gleneagles-G8-Gipfel in 2005 gegründete „Global Bioenergy Partnership“ vorgesehen.

„nachhaltige“ Exportpotenziale geben könnte, wenn entsprechende Flächennutzungen und Technologieentwicklung stattfänden.

Erste reale Beispiele für die verstärkte Biokraftstoffbereitstellung direkt in Entwicklungsländern – also nicht für Exporte – wurden bei einem Workshop der Global Environment Facility (GEF) im Spätsommer 2005 vorgestellt (GEF-STAP 2005), und erste von der UN unterstützte Investitionsinitiativen gibt es bereits (UNEP/ Crestar 2005).

Eine Zusammenfassung der Argumente ist in der noch laufenden Global-Biofuels-Studie vorgesehen (WWI/ GTZ 2006), die sich u. a. auf die o.g. Fallstudien der GTZ stützt.

Aus heutiger Sicht ist – entsprechende Zertifizierung vorausgesetzt – künftig von steigenden Möglichkeiten für Biokraftstoffexporte aus Entwicklungsländern auszugehen. Wie hoch diese Potenziale sein werden und zu welchen Kosten sie in Deutschland importiert werden könnten, ist mit Ausnahme von Brasilien derzeit noch nicht absehbar.

Auch die Frage, unter welchen Bedingungen die heute existierenden speziellen Zölle für Bioethanolimporte nach Europa gesenkt werden oder entfallen, ist mit Blick auf die aktuelle Diskussion in Brüssel zur Biokraftstoffrichtlinie offen.[33] Wahrscheinlich ist allerdings, dass bei steigenden Bioenergieexporten eine längerfristige – stabilisierende – Wirkung auf die Preise für global gehandelte Agrarprodukte wie Weizen und Mais sowie Zucker entstehen wird, da diese Märkte gekoppelt sind. Damit ist eine Bereitstellung von Biokraftstoffen zu Preisen unter denen von Bioethanol aus Brasilien mittelfristig nicht zu erwarten.

3. Physische Importe oder Handel mit Biokraftstoffzertifikaten?

Da die Wirkungen von Treibhausgasemissionen nicht von ihrem Emissionsort abhängen, entsteht dieselbe Entlastung für die Klimabilanz egal ob Biokraftstoffe direkt in den Erzeugerländern eingesetzt werden oder ob sie z. B. nach Deutschland exportiert und hier genutzt werden. Weil im ersten Fall zusätzlich die physischen Transporte der Biokraftstoffe entfallen, fällt die Emissionsminderung insgesamt noch größer aus.

Eine Möglichkeit wäre daher, auf den physischen Handel ganz zu verzichten und die erreichbare Emissionsminderung als Biokraftstoffzertifikat handelbar zu machen. Dies wäre im Sinne der sog. „Flexiblen Instrumente“ des Kyoto-Protokolls (Emissionshandel, Joint Implementation, JI, und Clean Development Mechanism, CDM). Hierfür gibt es allerdings bislang noch wenig praktische Erfahrung. Ein Beispiel ist ein CDM-Pilotprojekt von Deutschland und Brasilien, bei dem Deutschland Emissionszertifikate erworben hat und im Gegenzug Brasilien den Einsatz von Biokraftstoffen in Taxis subventioniert (IEA 2004, S. 182).

Für dieses Vorgehen besteht aber eine Reihe von Hemmnissen (IEA 2004, S. 182 ff.). Zunächst gibt es noch keine allgemein akzeptierte Methodologie, um die erwarteten Emissionsminderungen Well-to-Wheels zu quantifizieren. Problematisch ist hier sowohl die Etablierung einer geeigneten Baseline als Referenz („Was würde geschehen, wenn das Projekt nicht durchgeführt würde“) als auch die Quantifizierung, das Monitoring und die Zertifizierung der Emissionsminderungen. Insbesondere für Nicht-IEA-Länder gibt es noch kaum Studien, die die Emissionen der Vorkette der Kraftstoffbereitstellung belastbar beziffern.

Ein weiteres Hemmnis liegt darin begründet, dass die Kosten der vermiedenen CO_2-Emissionen für Biokraftstoffe noch relativ hoch sind, verglichen mit anderen Maßnahmen zur Emissionsminderung (z. B. Erneuerung des Kraftwerksparks). THG-Zertifikate aus Biokraftstoffprojekten könnten jedoch ökonomisch attraktiv werden, wenn der Preis deutlich unter 50 US-Dollar pro t CO_2 gebracht werden könnte. Dies scheint sich z. B. in Brasilien abzuzeichnen (IEA 2004, S. 183). Mit dem Zertifikatehandel könnte allerdings nur das Problem des Klimawandels angegangen werden. Andere Treiber für den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen finden hier keine Berücksichtigung. Zu nennen wären hier u. a. die Verringerung der Abhängigkeit von Öl- und Gasimporten aus dem Mittleren Osten oder die Förderung der Entwicklung des ländlichen Raumes in Deutschland.

IX. Nutzungskonkurrenzen

Im folgenden Kapitel wird die Nutzungskonkurrenz vor allem zwischen Biokraftstoffen (inkl. Biogas) und stationärer Bioenergienutzung sowie – im Betrachtungszeitraum bis etwa 2020 mengenmäßig weniger relevant – zwischen regenerativem Wasserstoff und regenerativer Strombereitstellung betrachtet und qualitativ bewertet. Nutzungskonkurrenzen sind geprägt durch Zielkonflikte und z. T. widersprechende Restriktionen einerseits und durch das Verhältnis zwischen – begrenzten – Ressourcen (Potenzialen) und Nachfrage andererseits. Dies zeigt die folgende Abbildung 16. Kriterien zur Bewertung sind hier Vermeidungskosten und erzielbare CO_2-Minderungen. Die hier präsentierten Überlegungen zu den Nutzungskonkurrenzen basieren auf Öko-Institut/IFEU (2006).

[33] Der Ende 2005 vorgelegte Biomasse-Aktionsplan der EU zielt auf die Mobilisierung der „heimischen“ Bioenergie.

Abbildung 16

Nutzungskonkurrenz im Zusammenspiel der Nachfragesektoren, Potenziale und mögliche Ziele bzw. Restriktionen



Quelle: Öko-Institut/IFEU 2006

1. Generelle Überlegungen zu Nutzungskonkurrenzen

1.1 Zum Potenzialbegriff

Zur Ableitung der insgesamt zur Verfügung stehenden Biomassepotenziale muss zwischen verschiedenen Definitionen von Systemgrenzen und Randbedingungen unterschieden werden. In der Regel werden die verschieden abgegrenzten Energiepotenziale durch die Attribute theoretisch, technisch, technisch-ökologisch und wirtschaftlich konkretisiert.

– Unter dem theoretischen Potenzial versteht man das physikalische Angebot, das eine Obergrenze des verfügbaren Energieangebots darstellt.

– Wenn das technische Potenzial betrachtet wird, sind bereits etablierte Nutzungstechniken, Wirkungsgrade und die Verfügbarkeit von Flächen berücksichtigt.[34]

– Das technisch-ökologische Potenzial wiederum wurde um die Beiträge gemindert, die durch Anforderungen des Umwelt- und Naturschutzes reduziert werden – z. B. die Strohmenge, die zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit auf dem Acker, oder die Restholzmenge, die zur Sicherstellung der Spurenstoffversorgung im Wald verbleiben muss.

– Das wirtschaftliche Biomassepotenzial zieht zusätzlich die gegebenen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen mit in Betracht.

Potenzialanalysen müssen zudem berücksichtigen, dass nicht alle Potenziale sofort zur Verfügung stehen, sondern dass deren Erschließung wegen beispielsweise begrenzter Herstellungskapazitäten noch zusätzliche Zeit in Anspruch nimmt und dass sich die Randbedingungen (z. B. Bevölkerung, Nutzungsgrade, Energiepreise) über die Zeit ändern können – in der Regel sind daher dynamische Analysen notwendig.

1.2 Darstellung in der Literatur

In der aktuellen Literatur wird nur kursorisch auf das Thema Nutzungskonkurrenzen eingegangen. In Studien zur Biomassenutzung erfolgen die Potenzialbetrachtungen für Biokraftstoffe oft in der Art, dass 100 Prozent der verfügbaren Biomasse dem Kraftstoffsektor zugeordnet wird. Differenzierter beschäftigen sich CONCAWE (2004), DLR/IFEU/WI (2004) und Kraftstoffmatrix (2004) mit dieser Thematik, wobei DLR/IFEU/WI (2004) sich auf Öko-Institut (2004b) stützt, wo eine – allerdings nicht dokumentierte – szenariogestützte Analyse verschiedener Nutzungspräferenzen erfolgte. Das Verständnis von Nutzungskonkurrenz und die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden kurz dargestellt.

CONCAWE 2004: Hier wird das Thema der Nutzungskonkurrenz unter dem Titel „Alternative uses of primary energy resources“ erläutert. Darauf aufbauend, dass prinzipiell alle Primärenergieressourcen begrenzt sind – fos-

[34] So zum Beispiel die Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion – sowohl pflanzliche als auch tierische Produkte – oder zur stofflichen Nutzung; auch wird der wachsende Flächenbedarf für Siedlung und Infrastruktur mit einbezogen.

sile Energieträger durch die verfügbare Menge und Biomasse bezogen auf die zur Verfügung stehende Anbaufläche – werden die Energieträger Erdgas, Biomasse und Strom aus Windenergie andiskutiert. Leitfrage der Betrachtung ist, wie Treibhausgasreduktionen mit einem Minimum an Energieverbrauch realisiert werden können. Um Erdgas konkurrieren die Anwendungen stationäre Stromerzeugung, direkte Nutzung in Fahrzeugen, Umwandlung in FT-Diesel (GtL) und Erzeugung von Wasserstoff und dessen Nutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen und in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Ergebnis ist, dass die größte Treibhausgasreduktion pro MJ Erdgas bei der Stromerzeugung erreicht wird. Referenz ist hier die Stromerzeugung aus Kohle. Der direkte Einsatz von Erdgas in Fahrzeugen ermöglicht nur einen geringfügigen Klimavorteil; die THG-Emissionen pro MJ Erdgas bei einem mit FT-Diesel (GtL) betriebenen PKW liegen bei einer WtW-Betrachtung dagegen sogar etwas höher als beim Einsatz von Dieselkraftstoff. Es können erhebliche Mengen Treibhausgase eingespart werden, wenn aus Erdgas Wasserstoff hergestellt wird und dieser dann in Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt wird. Wird dieser stattdessen im Verbrennungsmotor eingesetzt, ist der Treibhausgasvorteil negativ im Vergleich zu Diesel- und Ottofahrzeugen.

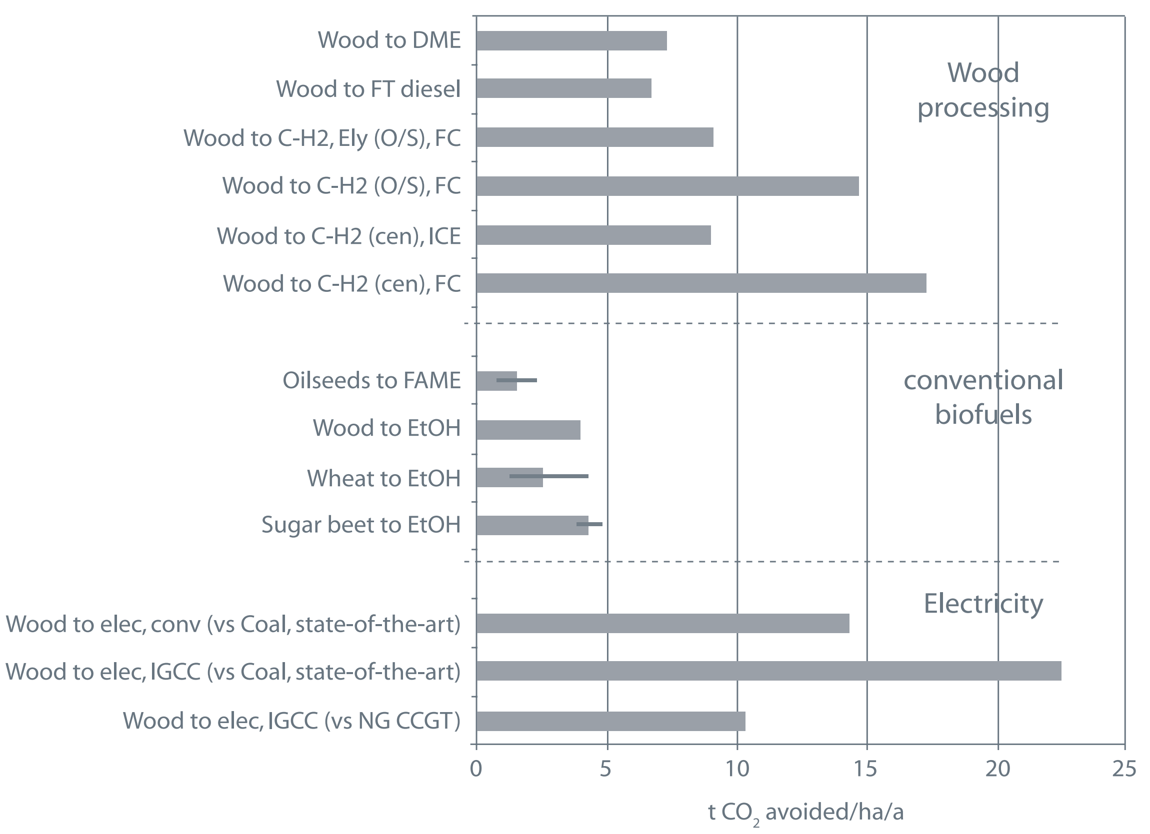
Die Diskussion der Nutzungskonkurrenz im Bereich Biomasse basiert in CONCAWE (2004) auf dem CO_2-Vermeidungspotenzial je ha Fläche. Abbildung 17 zeigt das Ergebnis. Die höchste CO_2-Vermeidung wird erreicht, wenn aus Holz im IGCC-Prozess (Integrated Gasification and Combined Cycle) Strom produziert wird; als Referenz wird auch hier die Stromerzeugung aus Kohle herangezogen. Wird diese Art der Stromerzeugung hingegen mit einer erdgasbetriebenen GuD-Anlage verglichen, dann halbiert sich der Vorteil bei den vermiedenen CO_2-Emissionen pro Fläche. Hier zeigt sich, wie stark die betrachtete Referenz für das Ergebnis ausschlaggebend sein kann. Aufgrund der hohen Effizienz der Brennstoffzelle hat auch die Produktion von Wasserstoff aus Holz ein hohes Potenzial, solange es in Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt wird. Vergleicht man die konventionellen Biokraftstoffe mit denen der zweiten Generation, so wird deutlich, dass die zukünftigen Biokraftstoffe ein höheres CO_2-Vermeidungspotenzial je ha aufweisen.

Bei der Betrachtung von Windenergie kommt CONCAWE (2004) zu dem klaren Ergebnis, dass der erzeugte Strom am effizientesten direkt – also als Ersatz für fossil erzeugten Strom – eingesetzt wird.

Abbildung 17



CO_2-Vermeidungspotenzial für die Nutzung von Fläche zur Erzeugung verschiedener Energieformen



Quelle: CONCAWE 2004

DLR/IFEU/WI 2004: Die Analysen in dieser Studie zeigen, dass ein vorrangiger Einsatz biogener Reststoffe im stationären Bereich zu bevorzugen ist, da die Ausbeuten an Nutzenergie höher sind. Bezüglich einer Konkurrenz der Nutzung von Biomasse von Anbauflächen werden bis 2050 je zwei Varianten für die Szenarien BASIS und NaturschutzPlus gerechnet, bei denen zum einen die Biomasse bevorzugt im stationären Bereich eingesetzt wird und zum anderen bevorzugt im mobilen Bereich. Die Reststoffe gehen ausschließlich in den stationären Bereich (Abbildung 18). Nach DLR/ IFEU/WI (2004) sind erneuerbare Energien hinsichtlich Klimagasemissionen in absehbarer Zeit im Strombereich pro eingesetzter Energieeinheit um etwa das Zweifache wirksamer als im mobilen Bereich; daher sollten die regenerativen Substitutionspotenziale zunächst auf den Stromsektor fokussiert werden, um die Entlastungswirkungen erneuerbarer Energien zum Klimaschutz möglichst rasch zu realisieren.[35]

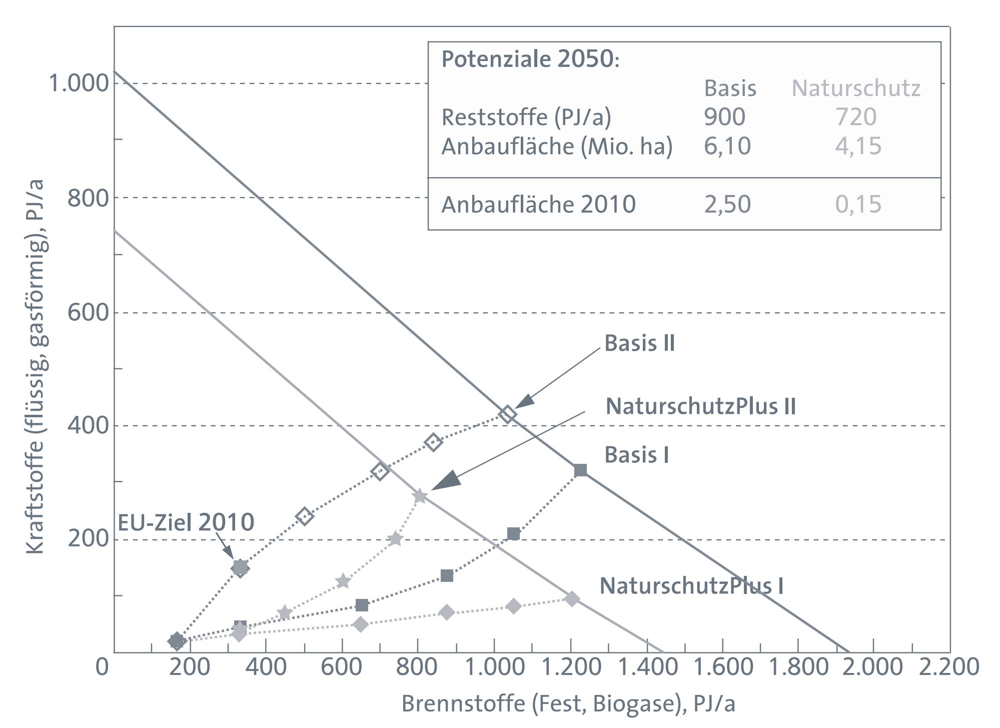
Kraftstoffmatrix 2004: In der Kraftstoffmatrix der Bundesregierung wird die Nutzungskonkurrenz in einem Exkurs behandelt. Fokussiert wird hier auf die Biomassepotenziale, um die der stationäre und der mobile Sektor konkurrieren. Mit einbezogen wird zusätzlich, dass auch andere Nachhaltigkeitsziele wie der Ökolandbau und Naturschutzbelange um die nutzbaren Flächen zum Anbau von Biomasse konkurrieren. Derzeit wird die Biomasse hauptsächlich im Wärmebereich genutzt; 2003 betrug der Anteil der Biokraftstoffe am Treibstoffbedarf in Deutschland nur 1,3 Prozent. Bei einem völligen Verzicht auf die Umsetzung weiterer umweltpolitischer Ziele und bei 100 Prozent Selbstversorgung ließen sich im Jahr 2010 1.300 PJ Endenergieträger aus Biomasse produzieren. Wenn von einer schnellstmöglichen Umsetzung der verschiedenen Nachhaltigkeitsziele ausgegangen wird, würde sich die Menge auf 600 PJ reduzieren. Würde man das technisch verfügbare Biomasseaufkommen vollständig in die Produktion von Biokraftstoffen geben, dann könnten im Jahr 2010 bis zu 9 Prozent und im Jahr 2020 etwa 33 Prozent der fossilen Kraftstoffe (bezogen auf die derzeitigen Absatzmengen) substituiert werden, was nur die rein theoretischen Potenziale darstellt und nicht die unter Aspekten des Umweltschutzes und der Wirtschaftlichkeit sinnvollsten.

Unter dem Gesichtspunkt Klimaschutz wird angegeben, dass mittelfristig die Verwendung von Biomasse in (sta-

[35] Das Mengengerüst für die biogenen Potenziale wird in der Studie bis 2030 aus Öko-Institut (2004b) übernommen und danach vereinfacht bis 2050 fortgeschrieben.

Abbildung 18

Darstellung von je zwei Pfaden einer möglichen Nutzung der ermittelten Biomassepotenziale für die stationäre und mobile Nutzung in den DLR/IFEU/WI-2004-Szenarien BASIS und NaturschutzPlus



Jede Markierung entspricht einem Abstand von zehn Jahren beginnend im Jahr 2000.
Quelle: DLR/IFEU/WI 2004

tionären) KWK-Anlagen – verglichen mit der im mobilen Sektor – aufgrund hoher Umwandlungswirkungsgrade die höheren Klimagasminderungen aufweist. Durch Strukturänderungen im Strom- und Wärmesektor und durch die künftig verfügbaren Biokraftstoffe der zweiten Generation könnte sich dieses Verhältnis längerfristig jedoch umkehren.

2. Erneuerbare Energieträger: mobil oder stationär?

Die prinzipielle Konkurrenz um die Nutzung verfügbarer regenerativer Energie zwischen dem stationären und dem mobilen Bereich konzentriert sich beim heutigen und künftig absehbaren Stand der Technologien vor allem auf die Bereiche Strom (als Input für die H_2-Herstellung sowie direkt als Energieträger für die Elektrotraktion) und Biomasse (als Input für die Bereitstellung von biogenen Kraftstoffen).

2.1 Erneuerbarer Strom oder Wasserstofferzeugung?

Aufgrund der erst längerfristig (nach 2020) zu erwartenden nennenswerten Beiträge von H_2 als Kraftstoff (Kap. V.3) und der technologisch bedingten geringen Attraktivität der Elektrotraktion im PKW- und LKW-Bereich[36] bezieht sich die Frage der Nutzungskonkurrenz darauf, ob anstelle der „gezielten“ Verwendung von regenerativem Strom zur H_2-Erzeugung nicht die direkte Netzeinspeisung des Stroms und damit der Ersatz konventioneller – d. h. in 2030 fossiler – Erzeugung wirksamer wäre. Dies ist allein eine Frage der Umwandlungseffizienz von regenerativ erzeugtem Strom zu H_2 als Antriebsenergie gegenüber konventionellen Kraftstoffen einerseits und den potenziell vermiedenen Emissionen der fossilen Erzeugung andererseits.

Soweit heute absehbar, wird 1 kWh erneuerbarer Strom zum Zeithorizont 2030 etwa 0,8 kWh H2 frei Fahrzeugtank bereitstellen können, wobei ein PEM-BZ-Elektromotorsystem gegenüber einem fortgeschrittenen Dieselmotor unter günstigen Bedingungen (Teillast) bis zum 1,5-fachen an fossilem Kraftstoff ersetzen könnte. WtW-seitig wären somit pro kWh regenerativem Strom rund 1,2 kWh fossiler Kraftstoffe ersetzbar. Würde demgegenüber der regenerative Strom direkt ins Netz eingespeist, würde je nach Lastprofil ein Mix von Braun- und Importsteinkohle- sowie Erdgaskraftwerken ersetzt. Wird vereinfachend von 50 Prozent Steinkohle- und 50 Prozent Erdgas-GuD-Anlagen ausgegangen, wären mit dem Technikstand 2030 dann etwa zwei Einheiten fossilen Brennstoffs ersetzbar.

Das bedeutet zusammengefasst, dass mit 1 kWh regenerativem Strom 1,2 kWh im Automobilbereich oder aber 2 kWh fossile Einheiten im Strombereich substituiert werden können. Die spezifischen THG-Emissionen des ersetzten fossilen Grenzmixes wären etwa gleich denen von Dieselkraftstoff, womit sich beim „Einspeisefall“ eine deutlich höhere THG-Vermeidung ergäbe.

Hinsichtlich der CO_2-Vermeidungskosten ist nun zu beachten, dass die H_2-Herstellung aus erneuerbaren Energien alleine schon notwendigerweise zu höheren Kosten führt als die direkte Stromeinspeisung. Hinzu kämen noch die gegenüber Dieselmotoren höheren Kosten für das BZ-Elektromotorsystem im Fahrzeug. Damit lägen die CO_2-Vermeidungskosten von regenerativ bereitgestelltem H_2 im mobilen Sektor auch langfristig signifikant über denen der direkten Stromeinspeisung.[37] Aus Sicht der CO_2-Vermeidungskosten geht die Nutzungskonkurrenz daher eindeutig zugunsten der Netzeinspeisung aus.

Ein Spezialfall, bei dem gegenwärtig die H_2-Erzeugung statt der direkten Einspeisung diskutiert wird, sind Offshore-Windparks mit hoher Leistung. Hier sind ggf. die vermiedenen Kosten der Netzanbindung von netzfernen Erzeugungsanlagen bzw. die Möglichkeit der Verstetigung der Lastabgabe und der Erzeugung von Regelenergie in Rechnung zu stellen. Dies könnte unter Umständen den Ausschlag zugunsten der H_2-Erzeugung geben.

2.2 Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse

2.2.1 Nutzung von Flächen

Eine grundlegende Konkurrenzsituation ist in der Flächennutzung zu sehen. Hier steht die Zuordnung der gegebenen Fläche zu den unterschiedlichen Nutzungszwecken – Land- und Forstwirtschaft, Siedlung und Verkehr sowie Natur- und Landschaftsschutz bzw. Erholung – im Mittelpunkt. Erst durch Veränderungen im Bereich der Nutzungsansprüche kommt es künftig zu möglichen Nutzungskonkurrenzen.[38] Da der Zuwachs von Siedlungs- und Verkehrsflächen gemäß der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung zukünftig drastisch abnehmen soll,

---

[36] Dies gilt zumindest so lange, wie keine (kosteneffizienten) Speichermedien für Strom – außer H_2-BZ-Kombinationen – gefunden und im Markt eingeführt werden können. Die heute absehbaren Batterie- und mechanischen Speicherkonzepte schränken aufgrund der geringen Speicherdichten und hohen Kosten die Anwendung der direkten Elektrotraktion auf wenige Nischen ein.

[37] Diese Aussage wäre nur dann zu korrigieren, wenn die direkte Netzeinspeisung z. B. durch stark fluktuierende Leistung oder durch Netzengpässe zu weiteren Investitionen (Stromspeicher, Netzausbau, Spitzenlastkraftwerke etc.) führen würde. In diesem Falle könnte die Konversion zu speicherbarem H_2 ggf. geringere Gesamtkosten aufweisen. Dennoch bliebe der Unterschied in der THG-Bilanz, der erst bei Steinkohleanteilen im ersetzten Mix unter 25 Prozent gegen Null geht. Nur die Kombination dieser Effekte könnte zu gleichen THG-Reduktionskosten von „mobilem“ H_2 mit direkter Einspeisung von regenerativem Strom führen.

[38] Aufgrund der relativ langen Umtriebszeiten (80 bis 120 Jahre) in der deutschen Forstwirtschaft ist die Flächennutzung für Wald ein sehr träges System – im Zeitraum bis 2010 könnte theoretisch somit ca. 10 Prozent der Waldfläche durch andere Nutzungen ersetzt werden. Dies ist jedoch aufgrund des Waldgesetzes, der steuerlichen Situation und der politischen Vorgaben in Deutschland keine sinnvolle Fragestellung. Daher wird dieses Thema hier nicht weiter erörtert.

bleiben als grundsätzliche Konkurrenzbeziehung Ansprüche des Natur- und Landschaftsschutz sowie der Erholung.

Eine Quantifizierung, die sich auf den Status quo und die Dynamiken dieser Nutzungsansprüche stützt, ist methodisch schwierig und bislang noch nicht durchgeführt worden. Hilfsweise wurde z. B. in Öko-Institut (2004b) das Problem so gelöst, dass ein mittelfristiges Schutzziel von 10 Prozent der land- und forstwirtschaftlichen Flächen angenommen wurde, und auch in Öko/Alterra/AEAT/EFI (2006) wurde ein entsprechendes Ziel für die EU-25 formuliert.[39] Damit wird ein grundlegender Vorrang des Anspruchs von Natur- und Landschaftsschutz auf eben diese 10 Prozent unterstellt und somit keine weitere Abwägung durchgeführt.[40]

Die Frage von Erholungsansprüchen wurde bislang nicht in vorliegenden Studien aufgegriffen, dürfte jedoch – im Sinne von zusätzlich denkbaren Ansprüchen – eher geringen Umfang haben.

2.2.2 Konkurrenz um die Nutzung von Flächen für klassische oder „neue“ Agrarprodukte

Die zweite grundlegende Konkurrenzsituation bei der Biomasse besteht zwischen der Nutzung von Agrarflächen für den Nahrungs- und Futtermittelsektor (zur Eigenversorgung sowie für Exporte) einerseits und möglichen „neuen“ Anbauformen bzw. -produkten für Nichtnahrungsmittelsektoren andererseits.

National gesehen wurde mit der ausführlichen Analyse in Öko-Institut (2004b) gezeigt, dass es mittelfristig aufgrund der agrarpolitischen Rahmenbedingungen, der Ertragsentwicklung und den Nachfragetrends zu einem Rückgang des Flächenanspruchs für klassische Agrarprodukte kommen wird, womit grundsätzlich Flächen für den Anbau von Non-Food-Produkten „freigesetzt“ würden. Dies wird jedoch zumindest teilweise dann kompensiert, wenn Ökolandbau und extensive Bewirtschaftungsformen steigende Anteile annehmen, da diese deutlich geringere Flächenerträge aufweisen als konventionelle Anbauweisen.

In IE/BFH/UH/Öko (2006) wird diese Analyse weitergeführt auf die EU-25-Ebene, wo sich ähnliche Verhältnisse wie in Deutschland ergeben. Zudem untersuchte diese Arbeit die Frage der – als Folge der Liberalisierung der Agrarmärkte – sinkenden Exporte von Lebens- und Futtermitteln aus Europa bzw. steigenden Importen von solchen Produkten (z. B. Weizen, Zucker).

Erste globale Analysen – z. B. Hoogwijk et al. (2005) und MNP (2005) – zeigen, dass die weltweiten Anbauflächen auch längerfristig ausreichen, um eine „echte“ Flächenkonkurrenz zwischen klassischen Futter- und Nahrungsmitteln einerseits und „neuen“ Non-Food-Produkten andererseits nicht entstehen zu lassen, selbst wenn steigende Bevölkerungszahlen, Verschlechterung der Böden und andere Faktoren einbezogen werden.

Auch ein Expertenworkshop im Rahmen der Studie IE/BFH/UH/Öko (2006) ergab keine Kopplung zwischen globalem Nahrungs- und Futtermittelanbau, (reduzierten) Exporten von Agrarprodukten aus der EU und dem Problem „Hunger“ in Entwicklungsländern – teilweise wird sogar von positiven Wirkungen auf die Ernährungssicherheit ausgegangen, wenn Biokraftstoffe angebaut und lokal genutzt oder exportiert würden (UNCTAD 2005).

Für die deutsche Potenzialfrage ist damit wesentlich, dass bei – angenommenen – künftigen Selbstversorgungsgraden für Nahrungsmittel von 100 Prozent (und damit Reduktionen des Exports) keine Flächennutzungskonkurrenz zu Non-Food-Anbau besteht, sondern gerade der Rückgang der „klassischen“ Anbausysteme Chancen für Non-Food-Produkte eröffnet.

2.2.3 Konkurrenz um die Nutzung von (angebauter) Non-Food-Biomasse

Die dritte prinzipielle Konkurrenzsituation besteht bezüglich der Nutzung der auf gegebenen Flächen anbaubaren Non-Food-Biomassen, d. h. nachwachsenden Rohstoffe (NaWaRo) sowie – zumindest grundsätzlich – auch biogenen Reststoffe (z. B. Schwach- und Waldrestholz, Reststroh, Gülle).

Bei den NaWaRo ist bis 2010 – und erst recht danach – bei insgesamt begrenzten Anbauflächen die Frage akut, ob diese am nachhaltigsten als Rohstoff, als Energieträger oder als Ausgangsstoffe für Biokraftstoffe genutzt werden bzw. welcher Mix dieser Produkte am ehesten zielführend ist. Bei den biogenen Reststoffen besteht zumindest bis zum Jahr 2010 aufgrund der technologischen Entwicklung keine enge Konkurrenz, da mit den bis dahin kommerziell verfügbaren Technologien keine Biokraftstoffe aus biogenen Reststoffen erzeugt werden können.[41] Daher liegt ein weiterer Schwerpunkt bei der Auswertung der Studien auf Annahmen über die jeweils potenziell verfügbaren Mengen an Biomasse (Potenziale insbesondere für Energie und Kraftstoffe), deren „Allokationsphilosophie“ sowie angenommenen Restriktionen bei deren Erschließung.

[39] Zusätzlich gibt es auch indirekte Flächenansprüche durch Ökolandbau und umweltorientierte Landnutzungsformen (vgl. dazu weiter unten), die ebenfalls zumindest teilweise Naturschutzansprüche umsetzen.

[40] Wenngleich dieses Vorgehen für die meisten OECD-Staaten mit klaren Eigentumsregelungen, staatlicher Kontrollmacht und zivilgesellschaftlichen Rekursoptionen bei illegaler Flächennutzung ausreichen dürfte, ist es für viele Entwicklungsländer aufgrund anderer Bedingungen keinesfalls ausreichend.

[41] Dies gilt a priori nicht für Biogas, das aus z. B. Gülle und organischem Hausmüll erzeugt werden kann und grundsätzlich nach Aufbereitung „kraftstofffähig“ wäre. Hier sind jedoch bis 2010 die absehbar im mobilen Sektor nutzbaren Potenziale durch die geringe Zahl von Erdgasfahrzeugen extrem begrenzt, sodass auch hier – mit Ausnahme lokaler Flotten wie z. B. Bussen oder Taxis – keine nennenswerte Nutzungskonkurrenz besteht.

2.2.4 NaWaRo: rohstofflich oder energetisch und mobil?

Die schon im Kapitel IX.1.2 genannten Studien weisen in der Tendenz einen Vorrang für die stationäre Nutzung nach, da diese unter dem Blick der THG-Vermeidungskosten effizienter ist als die Biomassenutzung im mobilen Sektor.

Unabhängig davon ist jedoch die rohstoffliche Nutzung prioritär, da sie in der Nutzungskette der Stoffe quasi vorgeschaltet werden kann. Vorausgesetzt, dass die Materialien nach der stofflichen Nutzungsphase in logistisch unaufwendiger Form erfasst und gesammelt werden können, sind sie daran anschließend energetisch bzw. als Kraftstoff nutzbar. Dies gilt für die mengenmäßig dominierenden Anwendungen im Bereich der Kunststoffe und Verpackungen, der Baustoffe sowie Textilien.[42]

Eine Nutzungskonkurrenz stoffliche versus energetische Nutzung ist damit für große Teile des Nutzungspotenzials zumindest nach 2010 nicht gegeben.[43]

2.2.5 Stationär versus mobil?

Somit bleibt als mögliche Nutzungskonkurrenz für Bioenergie diejenige zwischen stationärer (für Strom und/oder Wärme) und mobiler (als Kraftstoff) Nutzung. Kurzfristig ist dies nur für NaWaRo interessant, längerfristig jedoch auch für biogene Reststoffe (s. o.).

In Öko-Institut (2004b) wurde in mehreren Szenarien untersucht, wie sich unterschiedliche Allokationen zwischen Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung in Deutschland bis 2030 unter „nachhaltigen“ Randbedingungen bezüglich THG-Bilanz und Kosten darstellen, und daraus ein „nachhaltiger“ Pfad abgeleitet, der die THG-Bilanz maximiert und die Kosten minimiert – bei gleichzeitig hohem Beschäftigungsimpuls.

Diese – undokumentierten – Szenarioanalysen ergaben, dass bis 2030 kein Sektor „alleine“ die günstigste Nutzungsform darstellt – vielmehr nähern sich die Vor- und Nachteile zwischen (KWK-)Stromerzeugung und Kraftstoffbereitstellung tendenziell an mit einem etwas kleineren Anteil für direkte biogene Wärme.[44] Grund hierfür sind einerseits längerfristig sinkende Absatzpotenziale für biogene KWK, da viele der Potenziale schon durch dezentrale Erdgas-KWK-Systeme erschlossen sind, die erst nach 2030 sukzessive ersetzt werden können. Eine forcierte Erschließung und Ausbau des KWK-Gesamtpotenzials wird dabei nicht unterstellt. Biomasse-KWK als „optimale“ Nutzungsform kann daher den Markt für KWK-Wärme nicht nennenswert ausdehnen – und nur dann würden sich die theoretischen Vorteile der biogenen KWK auch voll umsetzen lassen.

Würde biogene KWK dagegen bestehende gasbetriebene KWK-Systeme ersetzen („Brennstoffwechsel“), so wäre die Substitution nur auf der Ebene „1 kWh Biomasse ersetzt 1 kWh Erdgas“ anrechenbar, und die Mehrkosten der biogenen KWK-Anlagen wären ebenfalls anzurechnen. Demgegenüber würde ein 1:1-Einsatz von z. B. Biogas in Erdgasfahrzeugen kaum zu Mehrkosten führen, aber ebensoviel Erdgas wie im KWK-Fall ersetzen.

Beim Vergleich der Nutzung von z. B. biogenen flüssigen Energieträgern (BtL) als Brennstoff für die Wärmebereitstellung gegenüber BtL als Kraftstoff zeigt sich, dass auf der „Wärmeseite“ im günstigsten Fall ein 1:1-Ersatz von Heizöl durch BtL erfolgt, real jedoch auch Erdgassubstitution mit einbezogen werden muss. Demgegenüber wird im Kraftstoffsektor ein weitgehender 1:1-Ersatz von Dieselkraftstoff erfolgen. Bei sonst gleichen Gestehungskosten würde sich volkswirtschaftlich damit eine höhere THG-Vermeidungseffizienz auf der Kraftstoffseite ergeben als bei der Wärme.

Bei der biogenen Wärmenutzung – ohne KWK und Biogaseinspeisung oder gar BtL – stehen aber als kostengünstige Optionen im dezentralen Bereich derzeit und absehbar vorwiegend Holzpelletssysteme zur Verfügung, die Brennstoff aus Reststoffen von Sägewerken nutzen. Hier würde eine Konversion zu Biokraftstoff über BtL, lignozellulotisches Ethanol oder auch H_2 zu energetischen Verlusten – und höheren Kosten – führen, sodass die THG-Vermeidungskosten hier klar für die biogene Wärme sprechen. Allerdings ist die Verfügbarkeit von Holzpellets mengenmäßig begrenzt.

Holzhackschnitzel (aus Rest- und Schwachholz oder auch Kurzumtrieb) dagegen erfordern für die umweltschonende Verbrennung den Einsatz in größeren Heizwerken bzw. Heizkraftwerken und können gleichzeitig „Rohstoff“ für BtL-Anlagen sein. Hier ist für die THG- und Kostenbilanz entscheidend, welche künftigen Lernkurveneffekte einerseits für die biogene Kraftstofferzeugung angesetzt werden und welcher Strommix durch die anteilige biogene Stromerzeugung der BtL-Anlagen ersetzt wird.

Als weitere Nutzungskonkurrenzoptionen für Holzhackschnitzel – aber auch für Reststroh und Ganzpflanzen – ist die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken gegenüber der Biokraftstoffherstellung zu nennen. Hier substituiert 1 kWh Biomasse direkt 1 kWh Kohle – und damit entsprechende THG-Emissionen. Die vermiedenen Kosten sind bei der Kohle aber gering – und damit steigen die THG-Vermeidungskosten wiederum an.

Bei BtL oder auch Bioethanol und biogenem H_2 zum Kraftstoffeinsatz werden dagegen deutlich teurere fossile Energieträger – Diesel bzw. Benzin – ersetzt. Hier wird somit zwar weniger THG, dafür aber mehr Geld gespart.

---

42 Ein Gegenbeispiel ist der Einsatz von NaWaRo als Schmierstoff oder Detergentien – ggf. ist aber eine indirekte Rückgewinnung über Klärgas zumindest teilweise möglich.

43 Allerdings kann es zu einer zeitlichen Verzögerung bei der „Nachnutzung“ kommen. Je nach Art der stofflichen Verwendung kann diese gering sein (z. B. bei Verpackungen) oder sehr groß (z. B. mehrere Dekaden bei Bauprodukten und einzelnen Kunststoffanwendungen).

44 Dabei ist zu beachten, dass in dieser Arbeit noch keine breitere Einspeisung von biogenen Gasen in vorhandene Gasnetze angenommen wurde. Dies könnte aber insbesondere den Einsatz biogener Energieträger im Wärmemarkt deutlich ausweiten bei – nach heutigen Kenntnissen – relativ geringen Kosten.

Wie der Vergleich im Detail ausgeht, hängt von den relativen Kosten und den spezifischen THG-Emissionen ab. Nach 2020 könnte – bei sinkenden BtL-Kosten durch Lernkurven – selbst gegenüber der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken eine leicht günstigere Bilanz entstehen.

In WI/IE/FHG/GWI (2005) ist für den Bereich Biogas aus Energiepflanzen ein Vergleich der Klimaschutzerträge und Zusatzkosten verschiedener Nutzungen angestellt worden (Abbildung 19):

Stationäre Stromerzeugung

– Verstromung ohne Wärmenutzung (oE)

– Verstromung mit 20 Prozent Wärmenutzung (oE-KWK)

– Verstromung mit 80 Prozent Wärmenutzung via Erdgasnetz (mE-KWK)

Stationäre Wärmenutzung

– Gastherme via Gasnetz (mE-Erdgastherme)

Nutzung als Kraftstoff

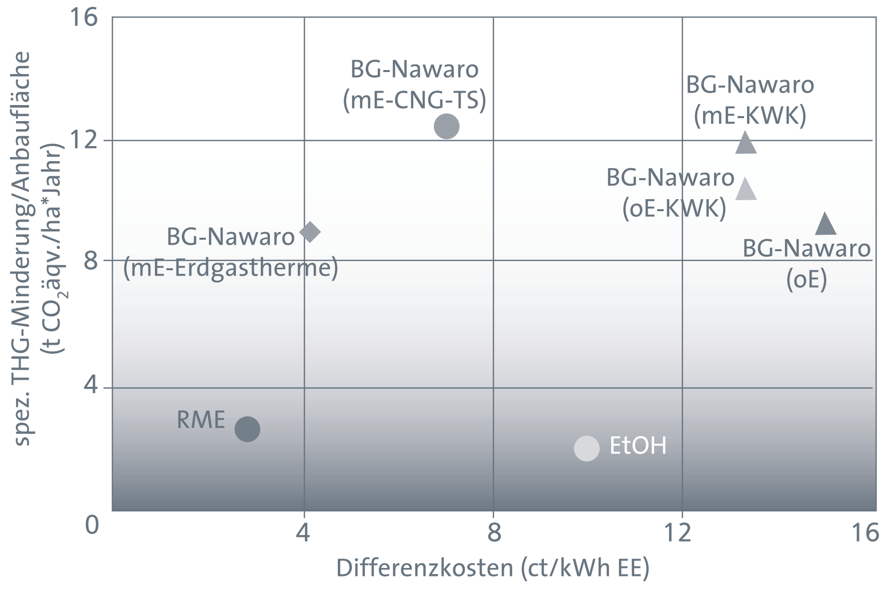
– CNG-Tankstelle via Gasnetz (mE-CNG-TS)

Diese werden verglichen mit den Biokraftstoffen der ersten Generation Biodiesel (RME) und Ethanol (EtOH). Im Ergebnis zeigt sich, dass die Kraftstoffnutzung im Vergleich die höchsten spezifischen THG-Minderungen pro ha Anbaufläche liefert. Wegen der Kostenstrukturen im Kraftstoffmarkt sind die Differenzkosten deutlich niedriger als bei der stationären Stromerzeugung. Kostenmäßig liegt nur die stationäre Wärmenutzung günstiger, allerdings bei niedrigeren THG-Minderungen. In der Treibhausgasbilanz schneiden die Kraftstoffe RME und Ethanol wesentlich ungünstiger ab.

Diese kurzen Ausführungen sollten zeigen, dass ohne eine detaillierte Modellierung konsistenter Szenarien mit entsprechenden Mengengerüsten, Kostenentwicklungen und Berücksichtigung von Sättigungseffekten keine belastbare Aussage zu den THG-Vermeidungskosten durch „stationäre“ im Vergleich zu „mobiler“ Nutzung von Bioenergie möglich ist.

Abbildung 19

Spezifische Klimaschutzerträge pro Anbaufläche verschiedener Biogasnutzungen (aus NaWaRo)



mE: Einspeisung ins Erdgasnetz, oE: keine Einspeisung ins Erdgasnetz, CNG-TS: Druckgastankstelle
Quelle: WI/IE/FHG/GWI 2005 Bd 1, S. 40

X. Infrastrukturanforderungen

Mit Ausnahme von Biokraftstoffen wie RME oder Ethanol, die voraussichtlich hauptsächlich den konventionellen fossilen Kraftstoffen beigemischt werden, oder synthetischen Flüssigkraftstoffen wie FT-Diesel erfordert eine Reihe CO_2-armer Kraftstoffe z. T. erhebliche Änderungen der Infrastruktur, die zu ihrer Bereitstellung „frei Tank“ notwendig sind. Hier sind vor allem gasförmige Kraftstoffe zu nennen, für die neue Verteilungssysteme und Tankstellenkonzepte erforderlich sind. Auch ist zu bedenken, dass die Wartung von Fahrzeugen mit neuen Technologien, seien es Antriebs- oder Tanksysteme, eine flächendeckende Verteilung von Werkstätten mit entsprechender Erfahrung benötigt. Mit dem Kraftstoff Erdgas sind bereits erste Erfahrungen gesammelt worden. Des Weiteren existieren einige Studien zu den Infrastrukturbedarfen und Investitionskosten von Wasserstoff. Das folgende Kapitel stützt sich wesentlich auf das Gutachten Öko-Institut/IFEU (2006).

1. Erdgasinfrastruktur

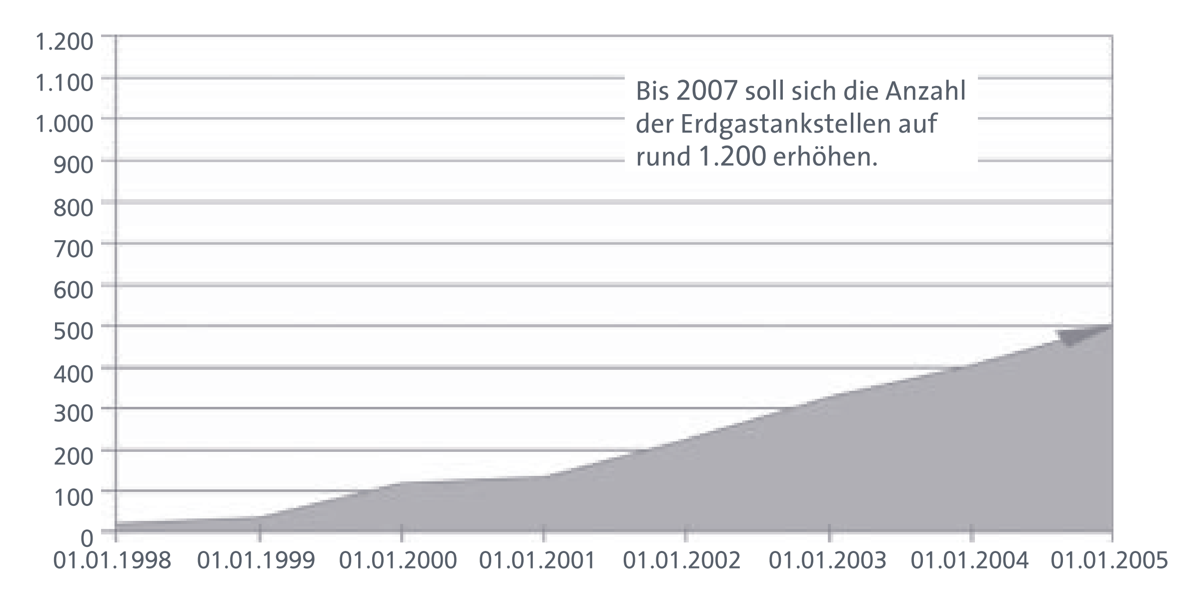
Im Januar 2006 boten in Deutschland 631 Tankstellen Erdgas an zur Versorgung von etwa 32 000 Erdgasfahrzeugen (BGW 2006). Die Entwicklung der Anzahl der Erdgastankstellen in Deutschland zeigt die Abbildung 20. Um den Einstieg in den Massenmarkt zu ermöglichen, plant die Erdgaswirtschaft in einer konzertierten Initiative, bis 2007 bundesweit etwa 1 200 Erdgastankstellen einzurichten. Damit sollen die Anfahrtswege auf maximal 25 km in ländlichen Gebieten und auf maximal 5 km in städtischen Gebieten verkürzt werden (BGW 2006). Die Angaben zu den hierfür anfallenden Kosten bewegen sich zwischen 150 und 250 Mio. Euro. Bis 2010 soll ein Bestand von 500 000 Erdgasfahrzeugen bedient werden können. Kleine Versorgungscontainer, die zwischen 10 und 30 Fahrzeuge pro Tag versorgen, können je nach Bedarf und Frequentierung der Tankstellen untereinander ausgetauscht werden (Tschatsch 2002, Czakainski 2002).

Allerdings muss trotz steigender Zahlen bei der Tankstelleninfrastruktur und Fahrzeugen konstatiert werden, dass die Verbreitung von Erdgas als Kraftstoff in Deutschland nur schleppend verläuft, obwohl durch die niedrige Besteuerung verlässliche und wirtschaftlich günstige Bedingungen geschaffen worden sind. Geht man vom EU-Ziel eines Erdgasanteils von 10 Prozent am Kraftstoffbedarf in 2020 aus, wären EU-weit ca. 5 850 Tankstellen erforderlich, um eine Flotte von 27 bis 28 Millionen Erdgasfahrzeugen zu versorgen. Die Gesamtkosten eines solchen Tankstellennetzes werden auf 6,6 Mrd. Euro geschätzt, ohne Betriebskosten und den evtl. notwendigen Ausbau des Erdgasverteilnetzes (IPTS 2004a, S. 3 ff.).

Wenn als langfristiges Ziel der Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft angestrebt wird, könnten sich die Erfahrungen, die bis dahin mit dem ebenfalls gasförmigen Erdgas als Kraftstoff gesammelt worden sind, als nützlich erweisen. Die existierende Erdgasinfrastruktur kann auch in gewissem Rahmen für Wasserstoff mitverwendet werden. So ist z. B. die Zumischung von bis zu 20 Prozent Wasserstoff ins Erdgasnetz technologisch unproblematisch (Lenz 2006). Der Betrieb mit reinem Wasserstoff ist jedoch ohne substanzielle Änderungen am Netz nicht machbar (u. a. wegen der H_2-induzierten Versprödung von Materialien).

Abbildung 20





Quelle: BGW 2006

2. Wasserstoffinfrastruktur

Ein flächendeckendes Netz von Wasserstofftankstellen ist eine wichtige Voraussetzung für die Diffusion entsprechender Fahrzeuge und damit für die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff. Nutzer werden an Tankstellen den Maßstab anlegen, den sie aus der Nutzung konventioneller Fahrzeuge kennen: Ein dichtes Tankstellennetz, kurze Warte- und Betankungszeiten und ein hohes Sicherheitsempfinden. Ein schlagartiger Aufbau eines flächendeckenden Tankstellennetzes ist kaum oder nur unter sehr hohem Investitionsaufwand realisierbar, da mit einer anfangs nur langsam zunehmenden Nachfrage zu rechnen ist. Naheliegende Gründe dafür sind der langsame „turn over" der Fahrzeugflotte, der parallel dazu über Jahrzehnte notwendige Aufbau von Produktionskapazitäten für Wasserstoff, die sorgfältig aufzubauende Akzeptanz seitens der Investoren und Nutzer, die Herausbildung marktfähiger Kosten, zu lösende technische Aspekte und die Entwicklung einheitlicher Standards.

Für die Lösung des Problems, ob zuerst das Tankstellenangebot geschaffen werden muss, um die Nachfrage nach Wasserstoff anzukurbeln, oder ob die Nachfrage nach Wasserstoff das Angebot an Tankstellen induzieren kann, gibt es aus heutiger Sicht keinen Königsweg. Am ehesten könnte es sich in der Praxis wohl dadurch lösen lassen, dass durch ein zeitlich eng verzahntes und den Marktphasen angepasstes Investitionsverhalten und Förderinstrumentarium ein jeweils marktfähiges Gleichgewicht erreicht wird. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass in der Pilot- und Einführungsphase Flottenbetreibern eine Schlüsselrolle zukommen könnte.

Eine Diskussion der Tankstelleninfrastruktur wäre jedoch unvollständig, würde man nicht berücksichtigen, dass Wasserstofftankstellen nicht nur ökonomisch, sondern auch konzeptionell, logistisch und technisch eng mit dem Modus der Wasserstoffherstellung und den technologischen Strategien im Bereich der Fahrzeuge verknüpft ist.

Eine wesentliche Determinante ist der Aggregatzustand, in dem der Wasserstoff geliefert und getankt wird. Ein im Bereich der Tankstelle ausschließlich flüssiger oder ausschließlich gasförmiger Aggregatzustand des Wasserstoffs reduziert den Investitionsaufwand beträchtlich verglichen mit der Notwendigkeit, beide Aggregatszustände vorzuhalten, zu betanken oder einen Umwandlungsschritt vorzusehen. Im Fall der dezentralen Herstellung des Wasserstoffs am Ort der Tankstelle durch Elektrolyse oder Erdgasreformierung erhöht sich die Komplexität von Genehmigungsverfahren und Sicherheitsfragen. Es stellt sich somit die Frage, ob Tankstellenbetreiber und -eigentümer in diesem Fall ihre Unternehmenstätigkeit auf die Wasserstoffherstellung ausweiten oder ob verschiedene Unternehmer am Standort Tankstelle tätig werden. Grundsätzlich sind daher bei allen Überlegungen zu Rahmenbedingungen in vor- und nachgeschalteten Teilketten die Auswirkungen auf die Funktionalität, die Komplexität, die Profitabilität und die ökologischen Auswirkungen der Tankstelle mitzudenken.

Die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur wäre zum heutigen Zeitpunkt deshalb verfrüht, da einige Technologieentscheidungen mit Schlüsselbedeutung noch nicht getroffen sind bzw. getroffen werden können, z. B. die Art der Speicherung von Wasserstoff im Fahrzeug. Daher sind eine verstärkte internationale Kooperation in Forschung und Entwicklung, die Weiterentwicklung von Infrastrukturkonzepten sowie die Erarbeitung und Festlegung von Normen und Standards unverzichtbar (IEA 2005, S. 17).

Infrastrukturanforderungen

Es gibt unterschiedliche Einschätzungen, wie groß der Anteil der Tankstellen, die Wasserstoff anbieten, sein sollte, um Kraftfahrer von der Anschaffung eines Wasserstofffahrzeugs zu überzeugen.

– Bevilacqua (2001) geht auf der Basis des Anteils der Tankstellen, die in Kalifornien Dieseltankstoff anbieten, davon aus, dass bei einer Bevorzugung der Ballungsräume 10 Prozent der Tankstellen in der Einführungsphase genügen.

– VES (2001) setzt in Deutschland 15 Prozent (2 000 Tankstellen) als Zielgröße an. Auch in DWV (2003) wird davon ausgegangen, dass man in Deutschland 2 000 Tankstellen benötigt, um eine grobe Flächendeckung zu erreichen.

– In einem Maximalansatz geht das Szenario der VES (2001) davon aus, dass innerhalb von 14 Jahren eine Umstellung von 95 Prozent der Tankstellen bewerkstelligt wird. Im Szenario „CE 100 CGH_2" (100 Prozent gasförmiger Wasserstoff aus regenerativ basierter Elektrolyse) werden für die Infrastruktur mit 12 000 Tankstellen, die den Wasserstoff durch Vor-Ort-Elektrolyse herstellen, Kosten von insgesamt 17,4 Mrd. Euro veranschlagt.

– In E4tech (2005) werden zwei Szenarien berechnet, die im Projekt „HyWays" von daran teilnehmenden Automobilherstellern erstellt wurden. Die Zahl der erforderlichen Tankstellen wurde von Annahmen zur Marktdurchdringung der Fahrzeuge abgeleitet. In der Anfangsphase werden relativ zur Größe des Fuhrparks viele Tankstellen gebaut. Als hohe Durchdringung werden für das Jahr 2030 28 Tankstellen pro 100 000 Wasserstofffahrzeuge bezeichnet, als geringe Durchdringung 16 Tankstellen pro 100 000 Wasserstofffahrzeuge.

Kosten für eine H_2-Tankstelleninfrastruktur

Die Einschätzungen zu den Kosten einer potenziellen Wasserstoffinfrastruktur für den mobilen Sektor sind zum heutigen Zeitpunkt noch sehr unterschiedlich und spekulativ, was unter anderem daran liegt, dass verschiedene Versorgungswege möglich sind. Die Wasserstofftankstellen sind eine wichtige Komponente und ein signifikanter Kostenpunkt in der Wasserstoffkette für die Anwendung im Verkehrsbereich. Die endgültigen Kosten für die Tankstellen sind mit noch großen Unsicherheiten behaftet, da kaum Erfahrungen mit solchen Tankstellensyste-

men vorliegen. Weltweit sind bis zum heutigen Zeitpunkt etwa 100 Wasserstofftankstellen errichtet worden (IEA 2005), die entweder komprimiertes H_2 (CH_2) bei 350 bar oder flüssiges H_2 (LH_2) bereitstellen. Da die meisten Brennstoffzellenfahrzeuge derzeit mit CH_2 betrieben werden, geht in den letzten Jahren der Trend verstärkt in Richtung CH_2-Tankstellen. Wesentliche Literaturquellen für die Kosten von H_2-Tankstellen sind (DWV 2003), deren Ergebnisse für Investitionskosten auch die Grundlagen von Szenarienberechnungen in IEA (2005) bilden, und E4Tech (2005).

In DWV (2003) werden neben einer allgemeinen Diskussion über die prinzipiellen Anforderungen an eine Wasserstoffversorgungsinfrastruktur Kosten für verschiedene Tankstellensysteme abgeleitet. Für die Herleitung der Investitionskosten werden die Wasserstofftankstellen in drei unterschiedliche Hauptgruppen unterteilt: CH_2-Tankstellen, an denen der Wasserstoff nur in seinem gasförmigen Aggregatzustand vorkommt, LCH_2-Tankstellen, wo H_2 flüssig hintransportiert und gasförmig in die Fahrzeuge befüllt wird, und LH_2-Tankstellen, wo H_2 sowohl in flüssiger Form angeliefert als auch an die Fahrzeuge abgegeben wird. Berechnet werden Tankstellensysteme mit einer Kapazität von 50, 500 und 1 300 kg H_2 pro Tag. Geht man davon aus, dass ein Brennstoffzellenfahrzeug 4 bis 5 kg H_2 benötigt, so können mit diesen Kapazitäten 10, 100 oder 300 Fahrzeuge pro Tag betankt werden. Zu berücksichtigen ist, dass weder Lernkurven noch Serieneffekte bei der Herstellung der verschiedenen Anlagen berücksichtigt wurden.

Bei der CH_2-Tankstelle wurden verschiedene H_2-Bereitstellungspfade betrachtet:

– Vor-Ort-Elektrolyse
– Vor-Ort-Reformierung von Erdgas
– Vor-Ort-Reformierung von Methanol
– Vor-Ort-Biomassevergasung
– Wasserstoffversorgung mit Pipeline
– Wasserstoffversorgung mit CH_2-Trailer

Die Gesamtinvestitionskosten setzen sich zusammen aus dem Wasserstofferzeuger bzw. -transport, dem Kompressor, dem Speicher, der Zapfsäule und der Installation. In der folgenden Tabelle 63 sind die Investitionskosten für zukünftige Tankstellen mit einem Druck von 890 bar im Speicher (Boosterkonzept) für komprimiertes H_2 wiedergegeben.

Wird der gasförmige Wasserstoff aus Flüssigwasserstoff an der Tankstelle bereitgestellt, dann werden in DWV (2003) als die wichtigsten Komponenten der stationäre LH_2-Speicher, eine LH_2-Hochdruckpumpe, ein umgebungsluftbeheizter Hochdruckverdampfer, ein CH_2-Pufferspeicher, die Zapfsäule und die Verrohrung und Instrumentierung angegeben. Die Gesamtinvestitionskosten dieses Tankstellenkonzepts (700 bar) belaufen sich

– bei einem täglichen Wasserstoffabsatz von 50 kg/d auf 491 000 Euro,
– bei einem täglichen Wasserstoffabsatz von 500 kg/d auf 1 283 000 Euro,
– bei einem täglichen Wasserstoffabsatz von 1 300 kg/d auf 1 902 000 Euro.

Das dritte Konzept – die LH_2-Tankstelle – besteht vor allem aus einem stationären LH_2-Speicher, einer LH_2-Transferpumpe und einer LH_2-Zapfsäule mit Füllschlauch und Füllkupplung. Die Investitionskosten, die auf den genannten Komponenten basieren, belaufen sich nach DWV 2003

– bei einem täglichen Wasserstoffabsatz von 50 kg/d auf 322 000 Euro,
– bei einem täglichen Wasserstoffabsatz von 500 kg/d auf 960 000 Euro,
– bei einem täglichen Wasserstoffabsatz von 1 300 kg/d auf 1 282 000 Euro.

In IEA (2005) werden für die Szenarien basierend auf DWV (2003) Investitionskosten für eine CH_2-Tankstelle (Pipeline) von 25 US-Dollar/GJ der jährlichen H_2-Kapazität angenommen. Basierend darauf, dass H_2 mit einem

Tabelle 63

Investitionskosten von CH_2-Tankstellen

	50 kg H_2/d	500 kg H_2/d	1.300 kg H_2/d
Elektrolyse	718	2.921	6.553
Erdgasreformer	1.018	3.181	4.204
Methanolreformer	801	2.281	4.034
Biomassevergaser	–	6.129	7.943
Pipeline	1.454	2.346	2.785
Trailerlieferung	625	1.468	2.716

Angaben in 1 000 Euro
Quelle: DWV 2003

Druck von 75 bar per Pipeline bereitgestellt wird, dann auf 800 bar komprimiert wird, sodass es mit 700 bar „on board“ zur Verfügung steht und in etwa drei Minuten betankt werden kann, wird zusätzlich ein Stromverbrauch von etwa 10 Prozent des Energiegehalts des Wasserstoffs geschätzt.

In E4tech (2005) werden drei verschiedene Tankstellensysteme betrachtet. Die Investitionskosten berücksichtigen Lernkurveneffekte in Abhängigkeit von der Zahl der gebauten Tankstellen.

– Bei Konzept 1 wird der Wasserstoff flüssig per LKW geliefert. 50 Prozent des H_2 werden dann flüssig und 50 Prozent als komprimierter Wasserstoff mit einem Druck von 850 bar bereitgestellt. Die Investitionskosten pro Tankstelle betragen bei einer sehr geringen Abnahme (gegen 0) 805 000 Euro, bei 885 Tankstellen pro Jahr verringern sich die Kosten auf 364 922 Euro und bei etwa 19 000 auf 308 675 Euro (High-uptake-Szenario).

– Bei Konzept 2 wird der Wasserstoff zu 50 Prozent flüssig angeliefert und abgegeben, 50 Prozent werden über On-Site-Reformierung von Erdgas aus dem Erdgasnetz als komprimierter Wasserstoff zur Verfügung gestellt. Hier betragen die Investitionskosten für eine geringe Abnahme (gegen 0) 3 412 000 Euro, bei 885 Tankstellen pro Jahr verringern sich die Kosten auf 1 475 254 Euro und bei etwa 19 000 auf 1 198 282 Euro (High-uptake-Szenario).

– Konzept 3 entspricht in etwa Konzept 2, nur wird anstelle der Reformierung ein Elektrolyseur eingesetzt. Hier betragen die Kosten für eine geringe Abnahme (gegen 0) 2 770 000 Euro, bei 885 Tankstellen pro Jahr verringern sich die Kosten auf 1 195 169 Euro und bei etwa 19 000 auf 993 873 Euro (High-uptake-Szenario).

XI. Forschungs- und Förderungsbedarf

Ausgehend von den Erkenntnissen aus den vorstehenden Kapiteln wird im Folgenden erörtert, welche Empfehlungen sich für die Forschungs- und Technologieförderung ergeben können, um die effektive Einführung von CO_2- und emissionsarmen Kraftstoffen sowie Fahrzeug- und Antriebstechnologien zu fördern. Im Rahmen dieses Berichts wird hier auf den Bedarf an öffentlicher Förderung fokussiert unter der Prämisse, die Ziele Kraftstoffeinsparung und Emissionsminderung möglichst effizient durch die (Weiter-)Entwicklung von Technologien zu befördern. Technologie- und industriepolitische Aspekte, wie z. B. die Förderung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit von bestimmten Branchen, stehen daher hier nicht im Mittelpunkt.

Unter diesem Gesichtspunkt ergeben sich einige grundlegende Überlegungen:

– Für eine effiziente Förderpolitik und die Vermeidung von Mitnahmeeffekten ist es wesentlich, Felder zu identifizieren, die nicht ohnehin von industriellen Entwicklern auch ohne Fördermittel bearbeitet würden.

– Optimierungen, wie letzte Schritte zur Markteinführung etc., sollten nur gefördert werden, wenn kapitalschwache, d. h. vor allem unabhängige kleine und mittlere Unternehmen, Zuwendungsempfänger sind.

– Die Ergebnisse sollten auf andere Produkte übertragbar sein. Branchenübergreifender Nutzen ist z. B. besonders im Bereich der Material- und Oberflächenforschung zu erwarten.

– FuE-Förderung auf den entsprechenden Gebieten, insbesondere wenn sie mit der Intention der Ressourceneinsparung und Klimaschonung erfolgt, sollte mit einer obligaten umweltwissenschaftlichen Begleitung der jeweiligen Projekte verbunden sein. Entsprechend sollten systematisch Kostendaten ermittelt werden.

Antriebs- und Fahrzeugtechnologien

Für die dargestellten Entwicklungen an konventionellen Verbrennungsmotoren gilt, dass sie sehr nahe am serienreifen Produkt stattfinden und die typische Kern-FuE-Tätigkeit von Fahrzeugherstellern betreffen. Dringender Förderbedarf besteht nicht.

Zur Reduktion der Fahrzeugmasse besteht weiterer FuE-Bedarf. Arbeiten im Bereich der Materialwissenschaften und Formgebung können evtl. breitere Anwendungen finden und wären damit als Querschnittsthema besonders förderungswürdig. Außerdem wirken sich deutliche Gewichtseinsparungen auch auf die Dimensionierung anderer Fahrzeugkomponenten, insbesondere den Antriebsstrang, aus und erschließen damit weitere Minderungspotenziale. Zum Thema Rollwiderstände sind ebenfalls weitere materialwissenschaftliche Arbeiten sinnvoll, sie treffen allerdings die Kern-FuE-Tätigkeit von z. B. Reifenherstellern und sollten nur bei großem Innovationsgehalt öffentlich gefördert werden. Der Luftwiderstand von Fahrzeugen für höhere Geschwindigkeiten wird standardmäßig optimiert. Forschungsbedarf besteht vor allem im Bereich der Computersimulation und möglicherweise der Oberflächentechnik.

Hybridfahrzeuge

Forschungsbedarf bei Hybridfahrzeugen besteht bezüglich nahezu aller Aspekte des Antriebsstranges, z. B. elektrische Motor-/Generatoraggregate, Getriebe, elektrische Energiespeicher, Steuergeräte und Wandler, Systemintegration bzw. Energie- und Antriebsmanagement für das effiziente Zusammenwirken aller Komponenten. Besonders sinnvolle Einsatzmöglichkeiten der Hybridtechnik bieten sich nicht nur in PKW, sondern auch in Nutzfahrzeugen, z. B. Lieferfahrzeugen und Linienbussen. Insgesamt ist hier der Forschungsbedarf durch die Aktivitäten der Industrieforschung der Hersteller gut abgedeckt. Eine Ausnahme könnte der Freikolbenlineargenerator darstellen, der als sehr innovative und effiziente Komponente für serielle Hybride deren Kosten erheblich senken könnte.

Das größte Defizit in der Entwicklung weisen derzeit die Energiespeichersysteme in Hybridfahrzeugen auf. Wegen

der hohen Anforderungen, z. B. was Speicherdichte, Lade-Entlade-Zyklen und Dynamik der Leistungsentnahme angeht, müssen hochbelastbare Batterien und Speicherkondensatoren entwickelt werden. Fortschritte auf diesem Gebiet könnten in anderen Anwendungszusammenhängen einen branchenübergreifenden Nutzen auslösen.

Brennstoffzellenfahrzeuge

Bei Brennstoffzellenantrieben besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, der sich auf praktisch alle Komponenten – insbesondere Katalysator, Membran und Bipolarplatte – und die Systemintegration erstreckt. Hauptziele sind Langlebigkeit und höhere Leistung bei deutlicher Kostenreduktion.

Beim Katalysator werden Reduktionen der benötigten Edelmetalle und für die Membranen höhere Temperaturbeständigkeit (Leistung, Wassermanagement) angestrebt. Für die kostenintensiven Bipolarplatten werden verschiedene Werkstoffe (Metalle und kohlenstoffbasierte) und Herstellungsverfahren diskutiert (z. B. Pressen, Gießen). Vor allem auch unter Kostenaspekten besteht großer Forschungsbedarf bei Speichern für Wasserstoff (Tanks für Flüssig- und Druck-H_2, Metallhydride, Kohlenstoffnanofasern, Eisenschwamm, Mikroglaskugeln); bei Druckwasserstoff (bis 700 bar) sind zudem Sicherheitsaspekte verstärkt zu berücksichtigen.

Öffentliche Förderung sollte allerdings nur bei tatsächlich innovativen Ansätzen erfolgen. Bloße Optimierungen und die Darstellung zunehmend praxistauglicher Fahrzeuge sollte ausschließlich aus Mitteln der Industrie gefördert werden. Materialwissenschaftliche Arbeiten können evtl. über Brennstoffzellenfahrzeuge hinausgehende Anwendungen finden und wären damit als Querschnittsthema besonders förderungswürdig. Das System Wasserstoff-/Brennstoffzelle wird sowohl auf Bundesebene als auch auf europäischer Ebene derzeit mit gut ausgestatteten Forschungsprogrammen gefördert (BMVBS/BMBF/BMWi 2006).

Kraftstoffe

Bei den konventionellen Verfahren zur Herstellung von Biodiesel und Bioethanol gibt es zwar Entwicklungsbedarf, dieser liegt aber im Rahmen einer typischen Optimierung von Anlagen.

Der derzeitige Stand der Biogasnutzung wurde überwiegend durch praktische Erfahrungen mit Anlagen gewonnen. Die zugrunde liegenden mikrobiologischen Prozesse sind wissenschaftlich noch nicht im Detail aufgeklärt. Diese grundlegenden Wissenslücken müssen geschlossen werden, um die Anlagen effizienter betreiben zu können. Die Nutzung von Biogas bietet noch technische Minderungspotenziale etwa bei Aufbereitung und Einspeisung, für die bislang kaum FuE-Mittel zur Verfügung stehen. Andererseits ist die Konversion von Biogas zu „green“ Gas-to-Liquids (GtL) noch kaum erforscht, böte aber ähnliche Vorteile bei der Nutzung wie BtL.

Zur marktreifen Weiterentwicklung der Biokraftstoffe der zweiten Generation besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. FuE-Aktivitäten zu lignozellulotischem Ethanol und BtL werden bereits umfangreich gefördert (Ethanol auf Lignozellulosebasis schwerpunktmäßig in Nordamerika, BtL bzw. Fischer-Tropsch-Synthese über Vergasung in Deutschland). FuE-Projekte zu Bioraffinerien werden im 6. Forschungsrahmenprogramm (FRP) der Europäischen Union und wahrscheinlich auch im 7. FRP in größerem Maßstab gefördert (EU-Kommission 2006).

Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht vor allem bezüglich der Ausgangsstoffe und der Ertragssteigerung, um so den Biomasseertrag pro Fläche zu erhöhen und damit den Einsatz von Energie pro Fläche zu senken. Dies hat nicht nur eine Reduzierung der Kosten und eine Steigerung des zur Verfügung stehenden Biomassepotenzials zur Folge, sondern auch eine Minderung der Treibhausgasemissionen in der Vorkette der Biokraftstoffe. Der Ertrag kann über neue, auf die für die Erzeugung von Biokraftstoffen optimierte, Pflanzenzüchtungen gesteigert werden.

Auch bei Anbau- und Ernteverfahren von Energiepflanzen besteht noch erheblicher Bedarf zur Weiterentwicklung optimierter prozesseffizienter Technologien von der Saat über die Ernte bis zur Bereitstellung am Ort der Nutzung.

Forschungsbedarf besteht bei der Verbesserung der Wasserstoffherstellungsverfahren und insbesondere bei der Entwicklung von Speichertechnologien und Infrastrukturkonzepten. Überzeugende technologische Lösungen des Speicherproblems sind unabdingbar auf dem Weg zu einer avisierten „Wasserstoffwirtschaft“. Großer Bedarf wird vor allem bei der Weiterentwicklung unter dem Aspekt der Kostendegression gesehen. Die Entwicklung der „H2&BZ-Roadmap“ im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (BMVBS/BMBF/BMWi 2006) ist hierfür förderlich.

Ein erheblicher Forschungsbedarf besteht derzeit bei der Erzeugung von Wasserstoff aus biogenen Energieträgern. Hierfür sind derzeit noch keine Verfahren bis zur Einsatzreife entwickelt.

XII. Prioritärer Untersuchungsbedarf für die Technikfolgenabschätzung

Aus dem in dieser Studie herausgearbeiteten Gesamtüberblick über den gegenwärtigen Wissens- und Diskussionsstand in den Themenbereichen Verkehrsträger und Antriebstechnologien sowie Kraftstoffe wurde eine Reihe von untersuchungsbedürftigen Fragestellungen identifiziert, die nach Einschätzung des TAB besondere Aufmerksamkeit verdienen, da sie sowohl für die Realisierung von Emissionsminderungen im Verkehrsbereich zentrale Bedeutung besitzen, als auch erhebliche Forschungslücken in diesen Feldern zu konstatieren sind. Prioritärer Untersuchungsbedarf wird auf folgenden Gebieten gesehen:

Verkehrsträger und Antriebstechnologien

– Potenziale zur Emissionsminderung der Verkehrsträger Schiene, Wasser, Luft

– Problembereich Güterverkehr – technologische Potenziale

Kraftstoffe

– Biokraftstoffe der zweiten Generation: Well-to-Wheels-Analysen

– CO_2-Abscheidung und -Lagerung bei der Herstellung von Kraftstoffen

– Importe von Biokraftstoffen

– Globale Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen

– Einführungsstrategien für alternative Kraftstoffe

Untersuchungsbedarf: Verkehrsträger und Antriebstechnologien

Potenziale zur Emissionsminderung der Verkehrsträger Schiene, Wasser, Luft

Der Straßenverkehr ist mit Abstand der am intensivsten untersuchte Verkehrsträger. Große Forschungsdefizite im Hinblick auf Potenziale zur Minderung von CO_2- und Schadstoffemissionen gibt es aber bei den Verkehrsträgern Schiene, Wasser und Luft. Die Gründe hierfür sind vielfältig:

Der Schienenverkehr ist verglichen mit dem Straßenverkehr ein sehr effizienter Verkehrsträger, dessen emissionsseitige Verbesserung daher vielfach nicht als prioritär angesehen wird. Die überwiegend eingesetzte Elektrotraktion weist schon heute einen vergleichsweise hohen Entwicklungsstand mit nur geringen weiteren Einsparpotenzialen auf. Dieselaggregate im Bahnwesen könnten im Prinzip mit denselben technologischen Ansätzen wie bei den Motoren im Straßenverkehr weiter optimiert werden, hinken aber in ihrer Weiterentwicklung dem Straßenverkehr deutlich nach. Eigenständige technologische Entwicklungen sind vor allem wegen des geringeren Marktvolumens von Schienenfahrzeugen nur spärlich anzutreffen.

Beim Verkehr auf Wasserstraßen treffen die beim Schienenverkehr genannten Argumente sogar noch verstärkt zu. Hinzu kommt, dass wegen des relativ geringen Anteils an der gesamten Verkehrsleistung der Schiffsverkehr vielfach zu Unrecht als Nischenerscheinung wahrgenommen wird.

Der Flugverkehr weist gegenwärtig von allen Verkehrsträgern mit Abstand die größten Steigerungsraten auf. Damit ist die Einhaltung von Emissionsminderungszielen im Verkehr ohne die Einbeziehung des Flugverkehrs kaum denkbar. Gleichzeitig ist aber das Spektrum der hierfür einsetzbaren Technologien begrenzt, was den Problemdruck in diesem Sektor erhöht.

Es besteht deshalb ein hoher Bedarf an TA-Untersuchungen, um offene Forschungsfragen zu klären, aber auch um die Aufmerksamkeit auf die Emissionsminderungspotenziale dieser Verkehrsträger zu lenken. Anderenfalls ist zu befürchten, dass diese erheblichen Potenziale im Lichte der als noch größer wahrgenommenen Potenziale des Straßenverkehrs schlicht „vergessen" werden. Aspekte, die dringend eine Bearbeitung erfordern, sind insbesondere:

– Die Rolle der sog. „nichtbeständigen Treibhausgase" (H_2O, NO_x, Partikel, Aerosole), die in großer Höhe ausgestoßen andere Wirkmechanismen aufweisen als am Boden, ist derzeit noch nicht geklärt. Unter bestimmten Bedingungen können diese stärker zum Treibhauseffekt beitragen als die „klassischen" Treibhausgase CO_2, Methan und N_2O. Aus den gewonnenen Ergebnissen wären Konsequenzen für die Bewertung von alternativen Antrieben und Kraftstoffen für den Flugverkehr abzuleiten. Darüber hinaus steht die Frage im Mittelpunkt, mit welchen technischen, aber auch z. B. organisatorischen (Planung von Flugrouten etc.) Maßnahmen eine wirksame Reduzierung der Treibhausgase möglich ist.

– Im Bahnverkehr sind über die Untersuchung neuer Antriebstechnologien und die Nutzung alternativer Kraftstoffe hinaus auch technologische Maßnahmen zu beleuchten und zu bewerten, die zur Effizienz und Attraktivität des Gesamtsystems Bahn beitragen. Dies sind zum Beispiel: Maßnahmen zur Beschleunigung des Wagenladungsverkehrs, Automatisierung der Rangierabläufe, automatische Kupplung, Automatisierung der Zugbildung, international kompatible Zugsicherungs- und Betriebsleitsysteme.

– Da mit rein technischen Innovationen nur ein Teil des bestehenden Potenzials für Effizienzsteigerungen und Emissionsminderungen angesprochen werden kann, spricht vieles dafür, sich nicht ausschließlich auf technische Fragestellungen zu beschränken, sondern auch wirtschaftliche und organisatorische Aspekte der gesamten Transportkette von Personen und Gütern in den Blick zu nehmen.

Problembereich Güterverkehr – technologische Potenziale

Bereits heute spielt der Güterverkehr eine bedeutende Rolle beim gesamten Verkehrsaufkommen. Dies wird sich in der Zukunft durch die zunehmende Internationalisierung des Handels und die wachsende Globalisierung der Wirtschaft noch verstärken. Diese wachsende Bedeutung hat sich bislang jedoch in Art und Umfang, wie der Güterverkehr im Hinblick auf seine Emissionsminderungspotenziale untersucht worden ist, nicht niedergeschlagen.

Insgesamt stellt sich die Datenlage für schwere Nutzfahrzeuge sehr viel ungünstiger dar als für PKW. So liegen praktisch keine Vergleichsstudien vor, die verschiedene Technologien betrachten und vergleichend bewerten. Bei LKW-Antriebstechnologien und anderen Aspekten wie

z. B. Leichtbau besteht damit erheblicher Forschungsbedarf. Einzeldaten zu bestimmten Maßnahmen liegen nur in sehr viel geringerer Menge vor. Maßnahmen zur Reduktion der Fahrwiderstände – Gewicht, Rollreibung, Luftwiderstand – könnten bei LKW möglicherweise größere Potenziale haben als bei PKW, fundierte Untersuchungen hierzu existieren derzeit noch nicht.

Untersuchungsbedarf: Kraftstoffe

Biokraftstoffe der zweiten Generation: Well-to-Wheels-Analysen

Biokraftstoffe der zweiten Generation (BtL, Lignozelluloseethanol) besitzen ein bedeutendes Potenzial zur Substitution fossiler Energieträger und zur CO_2-Minderung. Allerdings bestehen noch signifikante Forschungslücken bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung der Bereitstellungsketten dieser Kraftstoffe.

– Es gibt nur wenige Ökobilanzen, die sowohl Energie- und Treibhausgasemissionen als auch für die gleichen Prozessschritte die Kosten bilanzieren. Generell ist die Qualität der Kostendaten für die untersuchten Kraftstoffbereitstellungspfade noch nicht ausreichend. Hier bedarf es validerer Daten, die auch zukünftige technologische Entwicklungspotenziale und Skaleneffekte widerspiegeln.

– Auf dieser Grundlage sollten die Kosten-Nutzen-Relationen für die verschiedenen Kraftstoffe analysiert werden.

– Es sind keine umfassenden Bilanzen zu den weiteren Umweltauswirkungen der Kraftstoffvorketten (wie Versauerung und Eutrophierung) verfügbar; in der Regel wird dies eher qualitativ abgehandelt.

– Der Erntefaktor bei Biokraftstoffen, also die erzeugte Menge Energie pro ha, stellt für einen Vergleich zwischen den einzelnen Biokraftstoffpfaden eine sehr wichtige Größe dar, die für eine umfassende Bewertung mit hinzugezogen werden sollte. Die hierzu verfügbaren Daten sind jedoch noch sehr lückenhaft.

CO_2-Abscheidung und -Lagerung bei der Herstellung von Kraftstoffen

CO_2-Abscheidung und -Lagerung wird oftmals als vielversprechende Option zum Klimaschutz genannt. Eine fundierte Bewertung hinsichtlich der ökologischen und ökonomischen Effizienz dieser Technologie ist jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum möglich. Dem stehen noch erhebliche Lücken bei den Ökobilanzen der Kraftstoffherstellungspfade mit CO_2-Sequestrierung entgegen. Die Kenntnisse zu Kosten und Wirtschaftlichkeit der Sequestrierung sind aufgrund der unzureichenden Datenlage noch weniger verlässlich.

Wegen der strategischen Bedeutung der CO_2-Sequestrierung für eine zukünftige Klimaschutzpolitik kommt diesem Thema eine besondere Dringlichkeit zu. In diesem Zusammenhang müssten auch die bestehenden Wechselwirkungen des Verkehrs mit dem Kraftwerkssektor thematisiert werden.

Importe von Biokraftstoffen

Importe könnten eine Möglichkeit darstellen, die bestehenden Restriktionen bei nutzbaren heimischen Anbauflächen für Biomasse zu umgehen, die wirksam werden, wenn große Mengen von Biokraftstoffen erzeugt und abgesetzt werden sollen. Für den Welthandel sind damit zusammenhängende Fragestellungen von großer Relevanz. Verhandlungen zu möglichen Importen von Biokraftstoffen spielen eine gewichtige Rolle in der Doha-Entwicklungsrunde der Welthandelsorganisation WTO.

Allerdings existieren (fast) keine Ökobilanzen zu potenziellen Importprodukten wie Biodiesel aus Jatropha oder aus Palmöl. Diese Wissenslücken müssen umgehend geschlossen werden, will man nicht Gefahr laufen, für Umweltentlastungseffekte hierzulande Beeinträchtigungen anderswo in Kauf zu nehmen.

Ein dringlicher Schritt wäre die Entwicklung eines Kriterienrasters für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Kraftstoffimporten. Diese Kriterien könnten die Grundlage für eine Kennzeichnung von möglichen Importprodukten sein, ähnlich dem Schema, das z. B. für Tropenholzprodukte erfolgreich angewandt wird.

Globale Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen

Biomassepotenziale, Nutzungskonkurrenzen und die Möglichkeiten zu deren „Aufhebung“ durch integrierte Systementwicklung sind noch kaum detailliert untersucht worden. Für die Entwicklung einer konsistenten Strategie ist hier eine internationale bzw. globale Perspektive erforderlich. Es fehlt insbesondere an folgenden Arbeiten:

– Integrierte Analysen der Angebots- und Nachfrageentwicklungen für „stoffliche“ und energetische (inkl. mobile) Nutzungen von Biomasse bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Entwicklungen bei der globalen Ernährung und des Agrarwelthandels. Die dynamischen Effekte „gekoppelter“ Märkte sind noch weitestgehend unbekannt und auch die nachhaltig verfügbaren Potenziale sind umstritten.

– Konzeption und Analyse von gekoppelten Szenarien, in denen die stark wachsenden Verkehrsnachfragen in den großen Schwellen- und Entwicklungsländern (mindestens Brasilien, China, Indien, Südafrika) explizit mit einbezogen und dabei die Effekte von Biokraftstoffexporten und der gezielten Erschließung ausländischer Märkte in den genannten Ländern für CO_2- und emissionsarme Verkehrssysteme berücksichtigt werden.

– Erarbeitung von adäquaten Daten für kosten- und umwelteffiziente Anbausysteme für Bioenergie, insbesondere in (semi)ariden Gebieten, an marginalen Standorten und z. B. Bergbaufolge- und Karstflächen, die global mit über 1 Mrd. ha Fläche (vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern) eine dominante Rolle spielen könnten.

– Integrierte Anbausysteme speziell für Bioenergie (z. B. „2-Kulturen“- bzw. „Feuchtgutlinien“-Systeme) sind noch kaum untersucht, und für die Optimierungsmöglichkeiten von Faktoreinsätzen und Erträgen bei reinen Energiepflanzen gibt es bislang nur Schätzungen.

Einführungsstrategien für alternative Kraftstoffe

Das Mengenziel der EU-Biokraftstoffrichtlinie (Richtlinie 2003/30/EG) von 5,75 Prozent Marktanteil von Biokraftstoffen im Jahr 2010 hat eine europaweite Dynamik bei der Einführung von Biokraftstoffen ausgelöst. Mittel- und langfristige Ziele, die noch wesentlich über diesen Anteil hinausgehen, sind in der Diskussion. Andererseits stellt die starke Ausrichtung der Diskussion auf erwünschte (Mengen-)Ziele ein zentrales Problem dar. Für die Übergangszeit sind viele Kraftstoffoptionen denkbar und werden diskutiert, so vor allem im Rahmen der Kraftstoffmatrix der Bundesregierung, bei der die Möglichkeiten und Grenzen alternativer Kraftstoffe für die Jahre 2010 und 2020 aufgezeigt wurden (Kraftstoffmatrix 2004).

Über diese Diskussion hinausweisend besteht ein dringender Bedarf an Strategien, wie diese Ziele erreicht werden können. Bei der Entwicklung konsistenter Einführungsstrategien sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

– Die ökonomische und ökologische Konkurrenzfähigkeit von CO_2- und emissionsarmen Kraftstoffen muss an aktualisierten Preisannahmen und Umweltzielen sowie europäischen bzw. globalen Preisen für CO_2-Zertifikate gemessen werden.

– Für eine Bewertung der Rolle alternativer Kraftstoffe und Antriebe für eine nachhaltige Mobilität ist eine enge Verzahnung der Effekte auf Nachfrage- und Angebotsseite notwendig, was bisher kaum in Angriff genommen wurde.

– Auch eine nachhaltige Verknüpfung von Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung und -vermeidung und zur Steigerung der Effizienz gekoppelt mit der Einführung alternativer Kraftstoffe und Antriebe sollte in der Erarbeitung von Einführungsstrategien stärker Berücksichtigung finden.

– Die bislang vorwiegend national geprägten Analysen künftiger Mobilität sollten zumindest auf den europäischen Raum ausgedehnt und durch „globale Ausblicke“ mit den weltweiten Trends gekoppelt werden.

– Schließlich fehlt es an einer vergleichenden Auswertung der Strategien der einzelnen Mitgliedsländer der EU, um darauf aufbauend eine gesamteuropäische Strategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe und Antriebe im Verkehrsbereich unter ökologischen und ökonomischen Kriterien ableiten zu können.

Literatur

1. In Auftrag gegebene Gutachten

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2005a): Perspektiven eines CO_2- und emissionsarmen Verkehrs – Arbeitsteil: Verkehrsträger und Antriebstechnologien. Heidelberg

Öko-Institut (Öko-Institut e.V.) (2005a): Perspektiven eines CO_2- und emissionsarmen Verkehrs – Arbeitsteil: Kraftstoffe und Infrastruktur. Berlin

Öko-Institut, IFEU (Öko-Institut e.V., Institut für Energie- und Umweltforschung) (2006): Potenziale zur Minderung von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen: Integrierte Betrachtung von Kraftstoffen und Antrieben. Berlin/Heidelberg

2. Weitere Literatur

ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil Club) (2006): Bioethanol als alternativer Kraftstoff für Ottomotoren. http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/Alternative_Kraftstoffe/bioethanol/, Stand: 12.04.2006

AEA (AEA Technology Environment) (2001): Economic Evaluation of Emissions Reductions in the Transport Sector of the EU – Bottom-up analysis (Autoren: Bates J., Brand, Ch., Davison, P., Hill, N.). Abingdon

Argonne (Center for Transportation Research Argonne National Laboratory) (2002): Examining the Potential for Voluntary Fuel Economy Standards in the United States and Canada (Autoren: Plotkin, S., Greene, D., Duleep, K. G.). Argonne

Baitz, M., Deimling, S., Binder, M. (2004): Vergleichende Ökobilanz von SunDiesel (Choren-Verfahren) und konventionellem Dieselkraftstoff. Bericht im Auftrag von Volkswagen AG und DaimlerChrysler AG, Leinfelden-Echterdingen

Bay. LfU (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz) (2003): Informationen über Abgase des Kraftfahrzeugverkehrs (Autor: Rabl, P.). Augsburg

Bevilacqua (Bevilacqua Knight, Inc.) (Hg.) (2001): Bringing Fuel Cell Vehicles to Market: Scenarios and Challenges with Fuel Alternatives. Hayward, Kalifornien

BGW (Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. Trägerkreis Erdgasfahrzeuge) (2006): Das Erdgasfahrzeug. http://www.erdgasfahrzeuge.de, Stand: 06.07.2006

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2004): Positionspapier Alternative Antriebe/Hybridkonzepte. Bonn/Berlin

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2006): Haihaut – High Speed und High Tech. http://www.bmbf.de/de/1933.php, Stand: 08.05.2006

BMWA (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit) (2003): Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke. Bericht der COORETEC-Arbeitsgruppen, BMWA-Dokumentation Nr. 527, Berlin

BMWA (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit) (2005): Energiedaten 2005 – Nationale und Internationale Entwicklung. Aktualisierung 06.09.2005, http://www.bmwa.bund.de/Navigation/Technologie-und-Energie/Energiepolitik/energiedaten.html

Bockey, D. (2003): Biodiesel – Situation und Entwicklungsperspektive. In: Regenerative Kraftstoffe – Entwicklungstrends, F&E-Ansätze, Perspektiven. Fachtagung von Netzwerk Regenerative Kraftstoffe, ZSW und FVS, Stuttgart, S. 23–28

Boerrigter, H., Calis, H. P., Slort, D. J., Bodenstaff, H. (2004): Gas Cleaning for Integrated Biomass Gasification (BG) and Fischer-Tropsch (FT) Systems – Experimental Demonstration of Two BG-FT-Systems. The 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome

Boerrigter, H., van der Drift, A. (2003): Fischer-Tropsch Diesel from Solid Biomass. ThermoNET Meeting, Helsingør

Boukis, N., Diem, V., Galla, U., D'Jesus, P., Dinjus, E. (2003): Wasserstofferzeugung durch hydrothermale Vergasung. In: Regenerative Kraftstoffe – Entwicklungstrends, Forschungs-und Entwicklungsansätze, Perspektiven. Fachtagung des ForschungsVerbunds Sonnenenergie, Stuttgart, S. 165–175

BMVBS, BMBF, BMWi (2006): (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie): Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Berlin

Büttner, A., Heyn, J. (1999): Umwelt- und Kostenbilanz im Fahrzeugrohbau: Aluminium, Stahl und Edelstahl. In: VDI Berichte 1488, Düsseldorf

BVU, ifo, ITP, PLANCO (Beratergruppe Verkehr und Umwelt, ifo Institut für Wirtschaftsforschung, Intraplan Consult, PLANCO Consulting) (2001): Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung. München u. a. O.

CARB (California Air Resources Board) (2004): Staff Report: Initial Statement of Reasons for Proposed Rulemaking. Public hearing to consider adoption of regulations to control greenhouse gas emissions from motor vehicles, o. O.

Claußen, M., Vodegel, S. (2005): The CUTEC concept to produce BtL-fuels for advanced powertrains. Vortrag im Rahmen der International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies, Freiberg

CONCAWE, EUCAR, JRD/IES (The Oil Companies' European Association for Environment, European Council for Automotive R&D, Institute for Environment and Sustainability of the EU Commission's Joint Research Centre) (2003): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Version 1, o. O.

CONCAWE, EUCAR, JRD/IES (The Oil Companies' European Association for Environment, European Council for Automotive R&D, Institute for Environment and Sustainability of the EU Commission's Joint Research Centre) (2004): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-to-Tank Report.Version 1b, o. O.

CONCAWE, EUCAR, JRD/IES (The Oil Companies' European Association for Environment, European Council for Automotive R&D, Institute for Environment and Sustainability of the EU Commission's Joint Research Centre) (2005): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-to-Wheels Report.Version 2a, o. O.

Czakainski, M. (2002): Mittelfristig zunehmende Akzeptanz. Interview mit Dr. Jürgen Lenz. Mitglied des Vorstands der Ruhrgas. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 52(12), S. 838

DaimlerChrysler (2004): Hightech Report 2/2004. Stuttgart

Die Zeit (2000): Die Kunst des Klopfens (Aussagen Willand, J., im Jahr 2000 Bereichsleiter der Motorenforschung von Daimler Chrysler AG). Nr. 29/2000

Die Zeit (2004): Revolution im Tank. Nr. 29/2004

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (2003): Flottenverbrauch 2010 – Aktivierung des Reduktionspotenzials und Beitrag zum Klimaschutz (Autoren: Mehlin, M. et al.). Berlin u. a. O.

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (2004): Der Freikolbenlineargenerator – Einsatz von Modelica zur dynamischen Simulation (Autor: Pohl, S. E.). Vortrag, Esslingen 29.11.2004, http://www.bauschgall.de/essl04_3.pdf

DLR, IFEU, WI (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Institut für Energie- und Umweltforschung, Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH) (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland (Autoren: Nitsch, J. et al.). Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU, FKZ 90141803, Stuttgart u. a. O.

DoE (US Department of Energy) (2000): Technology Roadmap for the 21st Century Truck Program. Washington D. C.

DoE (US Department of Energy) (2004): Energy Efficiency and Renewable Energy: FreedomCAR and Vehicles Technologies. Washington D. C.

DoE (US Department of Energy) (2006): FY 2007 Congressional Budget Request. Vol. 3, Washington D. C., S. 141, http://www.cfo.doe.gov/budget/07budget/Content/Volumes/vol_3_ES.pdf, Stand: 28.03.2006

DWV (Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband) (2003): Möglichkeiten der Wasserstoffbereitstellung und das Tankstellennetz der Zukunft. Präsentation von DWV Vorstandsmitglied Reiner Wurster auf dem Hessischen Mobilitätskongress 2003, http://www.dwv-info.de/publikationen/2003/tanknetz.pdf, Stand: 29.06.2006

DWV (Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband) (2006): Wasserstoff-Spiegel Nr. 2/06. http://www.dwv-info.de/aktuelles/wss2006/wss0602.pdf, Stand: 10.05.2006

E4tech (2005): The Economics of a European Hydrogen Automotive Infrastructure. Im Auftrag der Linde AG, Final Report, o. O.

EEA (European Environment Agency) (2006): How much Bioenergy can Europe produce without harming the Environment? EEA Report 7/2006, Kopenhagen

EK (Enquete-Kommission) (2002): Endbericht der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung". Deutscher Bundestag, Drucksache 14/9400, Berlin

EPA (US Environmental Protection Agency) (2004): Hydraulic Hybrid Technology – A Proven Approach. EPA Fact Sheet No: EPA420-F-04-024, http://www.epa.gov/otaq/technology/420f04024.pdf, Stand: 08.05.2005

EPA (US Environmental Protection Agency) (2005): EPA announces partnership to demonstrate world's first full hydraulic hybrid urban delivery vehicle. EPA Fact Sheet No: EPA 420-F-05-006, http://www.epa.gov/otaq/technology/420f05006.htm, Stand: 08.05.2005

EPA DK (Danish Environmental Protection Agency) (2000): Modern Windships (Autor: Hansen, E.). Report for the modern windship project, phase 2, Kopenhagen

EPRI (Electric Power Research Institute) (2001): Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options. Palo Alto, Kalifornien

EU-Kommission (2001): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über alternative Kraftstoffe für den Straßenverkehr und ein Bündel von Maßnahmen zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen. KOM(2001) 547, Brüssel

EU-Kommission (2003): How to considerably reduce greenhouse gas emissions due to mobile air conditioners. Consulting Paper, Generaldirektion Umwelt, Brüssel

EU-Kommission (2006): Eine EU-Strategie für Biokraftstoffe. KOM(2006) 34 endg., Brüssel

Evers, D. (2005): Biodiesel – Unverzichtbar für eine nachhaltige Mobilität. Tagungsband „Kraftstoffe der Zukunft", Berlin, http://www2.biodieselverband.de/downloads/372/ filename

EWI, Prognos (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Prognos AG) (2005): Energiereport IV – Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030, Energiewirtschaftliche Referenzprognose. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Berlin u. a.O.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2005): The State of Food and Agriculture 2005. Rom

Fischer, G., Schrattenholzer, L. (2001): Global Bioenergy Potentials through 2050. In: Biomass and Bioenergy 20, S. 151–159

Ford (2005): Focus on Safety. In: Verband der Automobilindustrie, Tagungsband, Technischer Kongress „Umwelt und Energie – Fahrzeugsicherheit und Elektronik“ vom 16. bis 17. März 2005 in Ingolstadt

Friedrich, A. (2002): Fuel savings potential from low rolling resistance tires. Workshop on fuel efficient tires, Sacramento

FZK (Forschungszentrum Karlsruhe) (2006): Gaserzeugung aus Biomasse (Autoren: Malcher, L., Henrich, E., Leible, L., Wiemer, H.-J). Abschlussbericht – Kurzfassung, Karlsruhe

GEF-STAP (Global Environment Facility Science and Technology Advisory Panel) (2005): Workshop: Biofuels for Developing Countries. New Delhi, August 2005

GEMIS 4.3 (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme Version 4.3) (2005): Computermodell und Datenbank des Öko-Instituts. http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm

GM (General Motors) (2002): GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study. Verfasst von L-B-Systemtechnik (LBST) Ottobrunn im Auftrag von GM, BP, Exxon Mobil, Shell, Total Fina Elf, Ottobrunn

GM (General Motors) (2005): Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A North American Study of Energy Use. Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions (Autoren: Brinkmann, N., Wang, M., Weber, T., Darlington, T.), o. O.

GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH) (2005a): Liquid Biofuels for Transportation in Tanzania – Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century (Autoren: Janssen, R. et al.). Draft final report, München u. a. O.

GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH) (2005b): Liquid Biofuels for Transportation – India Country Study on Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy. Draft final report (TERI, ISEC, ICRISAT), Neu Delhi u. a. O.

GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH) (2005c): Liquid Biofuels for Transportation – Chinese Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century (Autoren: Wang Gehua et al.). Draft final report, Peking

GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH) (2005d): Liquid Biofuels for Transportation in Brazil – Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century. Draft final report (FBDS et al.), Rio de Janeiro

Hamelinck, C., Faaij, A. P. C. (2001): Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass. Utrecht

Hamelinck, C., van Hooijdonk, G., Faaij, A. (2003): Prospects for ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance as development progresses. Utrecht

Handelsblatt (2006): Lenkdrachen zieht Schiffe übers Meer. 26.01.2006, S. 28

Harling, H. (2006): Nachwachsende Rohstoffe aus der Sicht eines Züchtungsunternehmens. Vortrag auf der NABU-Fachtagung „Agro-Gentechnik – Eine Vision für die Zukunft?“ am 25. Januar 2006, Berlin, http://www.nabu.de/m06/m06_11/04644.html, Stand: 14.08.2006

Hassel, E., Wichmann, V. (2005): Ergebnisse des Demonstrationsvorhabens „Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöltauglichen Traktoren“. Abschlussveranstaltung am 9. November 2005, Hannover, http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/biokraftstoffe/pdf/100traktoren/100traktorenErgebnisse.pdf, Stand: 22.03.2006

Hemmes, K., de Groot, A., den Uil, H. (2003): Bio-H_2: Application potential of biomass-related hydrogen production technologies to the Dutch infrastructure of 2020–2050. Bericht im Rahmen des DEN-Programms, NOVEM und ECN, Utrecht

Henrich, E., Dinjus, E. (2005): Die Pyrolyseslurry-Vergasung des Forschungszentrums Karlsruhe. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Synthetische Biokraftstoffe – Techniken, Potenziale und Perspektiven. Reihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Bd. 25, Münster, S. 236–268

Herzog, H., Golomg, D. (2004): Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use. Encyclopedia of Energy Vol. 1, New York, S. 277–287

HLG (High level group for hydrogen and fuel cells) (2003): Hydrogen energy and fuel cells – a vision for our future. Summary Report, Brüssel

Hoogwijk, M., Faaij, A., de Vries, B., Turkenburg, W. (2005): Global potential of biomass for energy from energy crops under four GHG emission scenarios. Part B: The economic potential, Utrecht

IE, BFH, UH, Öko (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Universität Hohenheim, Öko-Institut e.V.) (2006): Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext – Analyse im Spannungsfeld nationaler Vorgaben und der Konkurrenz zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Bioenergieträgern (Autoren: Thrän, D. et al.). Endbericht zum FuE-Vorhaben gefördert vom BMU, Leipzig u. a. O. (in Vorb.)

IEA (International Energy Agency) (2001): Putting Carbon Back into the Ground. Report by the IEA Greenhouse Gas R&D Programme (Autoren: Davidson, J., Freund, P., Smith, A.), o. O., http://www.ieagreen.org.uk/putcback.pdf, Stand: 03.07.2006

IEA (International Energy Agency) (2004): Biofuels for Transport – An International Perspective. Paris

IEA (International Energy Agency) (2005): Prospects for Hydrogen and Fuel Cells. Paris

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2003a): Energy savings by light-weighting (Autoren: Helms, H., Lambrecht, U.). Heidelberg

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2003b): Erweiterung der Ökobilanz für RME (Autoren: Reinhardt, G. A., Gärtner, S. O.). Heidelberg

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2004a): Energy savings by light-weighting II (Autoren: Helms, H., Lambrecht, U.). Heidelberg

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2004b): CO_2-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme (Autoren: Quirin, M., Reinhardt, G. A., Gärtner, S. O., Pehnt, M.). Endbericht, im Auftrag von FVV, UFOP und FAT, Heidelberg

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2005b): Energy savings by light-weighting for European articulated trucks (Autoren: Helms, H., Lambrecht, U.). Heidelberg

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2005c): Fortschreibung Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960–2030. TREMOD (Transport Emission Modell) (Autoren: Knoerr, W. et al.), im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau/Heidelberg

INFRAS (2004): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 2.1, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft Bern und der Umweltbundesämter Berlin und Wien, Bern

IOGEN (2006): Pressemitteilung der Firma IOGEN vom 8. Januar 2006, Ottawa, http://www.iogen.ca/news_events/press_releases/2006_01_08.html, Stand: 10.4.2006

IPCC – TAR-Mitigation (2001): Intergovernmental Panel on Climate Change: Third Assessment Report: Technological and Economic Potential of Options to Enhance, Maintain, and Manage Biological Carbon Reservoirs and Geoengineering. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, London

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1999): Aviation and the Global Atmosphere – A Special Report of IPCC Working Group I and III (herausgegeben von Penner, J. E., Lister, D. H., Griggs, D. J., Dokken, D. J., McFarland, M.). New York u. a.O.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005): Special Report on Carbon Dioxid Capture and Storage. Summary for Policymakers, Genf

IPTS (European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies) (2004a): Potential for Hydrogen as a Fuel for Transport in the Long Term (2020–2030). Technical Report Nr. EUR 21090 EN, Sevilla, ftp://ftp.jrc.es/pub/EURdoc/eur21090en.pdf, Stand: 29.03.2006

IPTS (European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies) (2004b): The Introduction of Alternative Fuels in the European Transport Sector: Techno-economic Barriers and Perspectives. Technical Report Nr. EUR 21173 EN, Sevilla, ftp://ftp.jrc.es/pub/EURdoc/eur21173en.pdf, Stand: 29.03.2006

IPTS (European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies) (2005): Hybrids for road transport – Status and prospects of hybrid technology and the regeneration of energy in road vehicles. Technical Report EUR 21743 EN ftp://ftp.jrc.es/pub/EURdoc/eur21743en.pdf, Stand: 06.03.2007

ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung) (2003): Introduction of alternative transport fuels in the European energy market: Techno-economic barriers and perspectives. Workpackage D: Hydrogen (Autoren: Ragwitz, M., Wietschel, M., Hasenauer, U., Fakolade, O.), Karlsruhe

James, C. (2005): Executive Summary of Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2005. ISAAA Briefs No. 34, Ithaca, NY

Jaschinski, J. (2005): Umweltbundesamt FG I 3.2, persönliche Mitteilung, 02.07.2005

Kolke, R. (2004): Vergleich der Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Straßenverkehr. Dissertation, Magdeburg

Koßmehl, S.-O. (1995): Beurteilung der technischen und ökonomischen Bedingungen für den Einsatz von Biokraftstoffen im Kraftfahrzeug. Dissertation, Berlin

Kraftstoffmatrix (Expertenarbeitsgruppe der Bundesregierung) (2004): Bericht der Unterarbeitsgruppe „Kraftstoffmatrix“ zum Matrixprozess. Erläuterung der Kraftstoffverwendungsmatrizen 2010 und 2020, Berlin

LBST (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH) (2002): Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung – Endbericht (Autoren: Altmann, M., Blandow, V., Niebauer, P., Schindler, J., Schurig, V., Weindorf, W., Wurster, R., Zittel, W.). Ottobrunn

Lenz, J. (2006): Technische Innovationen in der Energiewirtschaft, Denkansätze in Systemen und Kreisläufen. Vortrag, Haus der Technik, Essen, 15.02.2006

Lightfoot, H. D., Green, C. (2002): An assessment of IPCC Working Group III findings in Climate Change 2001: Mitigation of the potential contribution of renewable energies to atmospheric carbon dioxide stabilization, C2GCR Report No 2002-5, Center for Climate and Global Change Research, McGill University, Montreal/Quebec, Kanada

Macedo, I. C., Verde Leal, M. R. L., da Silva, J. E. A. R. (2003): Assessment of the greenhouse gas emissions in the production of fuel ethanol in Brazil. Sao Paulo

Meier, D. (2003): Pyrolyseöle als Zwischenprodukte bei der Kraftstofferzeugung. In: Regenerative Kraftstoffe – Entwicklungstrends, F&E-Ansätze, Perspektiven. Fachtagung von Netzwerk Regenerative Kraftstoffe, ZSW und FVS, Stuttgart, S. 69–74

Meyer, B., Dimmig, T., Radig, W. (2005): Die BtL-Pilotanlage an der TU-Freiberg – ein Zwischenbericht. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Synthetische Biokraftstoffe – Techniken, Potenziale und Perspektiven. Reihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Bd. 25, Münster, S. 269–284

MIT (Massachusetts Institute of Technology) (2003b): The performance of future ICE and fuel cell powered vehicles and their potential fleet impact (Autoren: Heywood, J. B., Weiss, M. A., Schafer, A., Bassene, S. A., Natarajan, V. K.). Cambridge/Massachusetts

MNP (Milieu- en Natuurplanbureau) (2005): Integrated Model to Assess the Global Environment (IMAGE). Version 2.2: IPCC-SRES Global Scenario Analysis, Bilthoven, http://www.mnp.nl/image/

Moreira, J. R., (2002): Can Renewable Energy Make Important Contribution to GHG Atmospheric Stabilization? LAMNET Third Project Workshop, Brasilia

Moreira, J. R. (2004): Global Biomass Energy Potential. Paper prepared for the Expert Workshop on Greenhouse Gas Emissions and Abrupt Climate Change: Positive Options and Robust Policy, 30 September – 1 October, Paris

Mozaffarian, M., Zwart, R.W.R. (2003): Feasibility of Biomass/Waste-related SNG Production Technologies. Petten

MTP (Dr. Michael Taeger & Partner) (2005): Marktentwicklung von Pharmaglyzerin. Hannover

MTU (MTU Aero Engines) (2002): Erfüllung zukünftiger Umweltanforderungen durch den Einsatz eines Wärmeaustauschtriebwerkes (Autoren: Scheugenpflug, H. et al.). München

MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (2005): MWV-aktuell: Der monatliche Informationsdienst für Wirtschaft und Politik. Nr. 5/05, Hamburg

NESCCAF (Notheast States Center for a Clean Air Future) (2004): Reducing Greenhouse Gas Emissions from Light-Duty Motor Vehicles (Autoren: Cooper, C., Meszler, D., Brueckner, S.). O. O.

Novem (Nederlandse Organisatie voor Energie en Milieu) (2003): Ligno-cellulostic Ethanol – A second opinion (Autoren: Zessen, E., Weismann, M., Bakker, R. R., Elbersen, H. W., Reith, J. H., den Uil, H.). Utrecht

NRC (National Research Council) (2002): Effectiveness and Impact of Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Standards (Autor: Brown, D.). Washington D. C.

NRW (Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen) (2004): 2. Klimaschutzkongress NRW: Nachhaltige Mobilität – Technische Innovationen für den Klimaschutz im Verkehr. 04.11.2004, Düsseldorf, http://www.klimaschutzkongress-nrw.de/Kongressprogramm/kongressprogramm.html

OECD, IEA (Organisation of Economic Cooperation and Development, International Energy Agency) (2005): Making cars more fuel efficient. Paris

Öko, Alterra, AEAT, EFI (Öko-Institut e.V., Wageningen University & Research, AEA-Technology, European Forest Institute) (2006): Environmentally compatible bioenergy potentials in the EU-25. Study commissioned by the European Environment Agency (EEA), Darmstadt (in Vorb.)

Öko, DLR, IE, IFEU, TU-DD (Öko-Institut e.V., Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Energetik, Institut für Energie- und Umweltforschung, TU Darmstadt) (2006): Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Laufendes F&E-Vorhaben gefördert vom BMU, FZK 0327546, Darmstadt

Öko-Institut (Öko-Institut e.V.) (2004a): Emissionshandel im internationalen zivilen Luftverkehr (Autoren: Cames, M. et al.). Berlin

Öko-Institut (Öko-Institut e.V.) (Hg.) (2004b): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse (Autoren: Fritsche, U., Jenseits, W., Dehoust, G., Hünecke, K., Rausch, L., Schüler, D., Wiegmann, K. [Öko-Institut], Heinz, A., Hiebel, M., Ising, M., Kabasci, S., Unger, Ch. [Frauenhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik], Thrän, D., Fröhlich, N., Scholwin, F. [Institut für Energie und Umwelt gGmbH], Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A. [Institut für Energie und Umweltforschung], Baur, F., Bemmann, U., Groß, B., Heib, M., Ziegler, C. [Institut für Zukunftsenergiesysteme], Flake, M., Schmehl, M. [TU Braunschweig], Simon, S. [TU München]). Endbericht des Verbundprojekts, gefördert vom BMU, Freiburg u. a. O

Öko-Institut (Öko-Institut e.V.) (2005b): Kriterien zur Bewertung des Pflanzenanbaus zur Gewinnung von Biokraftstoffen in Entwicklungsländern unter ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Autoren: Fritsche, U. R., Hünecke, K., Wiegmann, K.). Kurzgutachten im Auftrag des BMZ, Darmstadt

RAND Europe, Institut für das Kraftfahrtwesen Aachen, Transport&Mobility Leuven (2003): Preparation of measures to reduce CO_2 emissions from N1 vehicles (Autoren: Lu, C. et al.). Leiden

Reijerkerk, J. (2006): Linde AG, persönliche Mitteilung, Kommentar zum Gutachten Öko-Institut 2005a

Reinhardt, G. (2003): Was weiß man heute zu Ökobilanzen von Biokraftstoffen? In: Regenerative Kraftstoffe – Entwicklungstrends, F&E-Ansätze, Perspektiven. Fachtagung von Netzwerk Regenerative Kraftstoffe, ZSW und FVS, Stuttgart, S. 13–22

Ricardo (Ricardo Consulting Engineers) (2003): „Carbon to Hydrogen“ Roadmaps for Passenger Cars: Update of the study for the Department for Transport and the Department of Trade and Industry (Autoren: Owen, N., Gordon, R.). Shoreham

Rudloff, M. (2005): SunDiesel – made by CHOREN. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Synthetische Biokraftstoffe – Techniken, Potenziale und Perspektiven. Reihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Bd. 25, Münster, S. 229–235

Schmitz, N. (Hg.) (2005): Innovationen bei der Bioethanolerzeugung. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Bd. 26. Münster

SEI (Stockholm Environment Institute) (2005a): Biomass, Sustainable Livelihoods, and International Trade. Presentation by Francis X. Johnsson at the IEA Task 40 Side Event at the World Bank Energy Week 2005, Washington D. C.

SEI (Stockholm Environment Institute) (2005b): Advancing Bioenergy for Sustainable Development (Autoren: Kartha, S., Leach, G., Rajan, S.C.). Guideline for Policymakers and Investors, Vol. I-III, prepared for World Bank ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program), Stockholm

SE Ireland (Sustainable Energy Ireland) (2004): Liquid Biofuels Strategy Study for Ireland (Autoren: Hamelinck, C., van den Broek, R., Rice, B., Gilbert, A., Ragwitz, M., Toro, F.). Dublin

Shell (2004): Shell Pkw-Szenarien bis 2030, Flexibilität bestimmt Motorisierung. Hamburg

Siegmund, Th. (2006): Bundesverband Bioenergie, persönliche Mitteilung

SkySails (2006a): Technologieinformation. http://www.skysails.info/fileadmin/user_upload/Pressedownload/Dokumente/06-04-20_Technologieinformation_SkySails.pdf, Stand 04/2006

SkySails (2006b): Pressemitteilung Fa. SkySails vom 25.01.2006. http://www.skysails.info/fileadmin/user_upload/Pressedownload/Dokumente/25-01-06_Pressemitteilung_Beluga_SkySails.doc, Stand: 08.05.2006

Solarthemen (2006): Pflanzenölschlepper künftig ab Werk? In: Solarthemen 230, Löhne, S. 7

Spiegel (2005): Spiegel Online: Hybrid-Elektromotoren – Flüsterer mit Bullenkraft. Ausgabe vom 15.08.2005

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2005): Umwelt und Straßenverkehr. Hohe Mobilität – Umweltverträglicher Verkehr, Sondergutachten, Berlin

Stan, C. (2005): Alternative Antriebe für Automobile, Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. Berlin u. a. O.

STEM (Swedish National Energy Administration) (2002): The Bio-DME Project, Phase 1 (Prepared by a Consortium of Abengoa SA, AB Volvo, AGA Gas AB, Haldor Topsöe A/S, LRF Lantbrukarnas Riksförbund, OKQ8, Preem Petroleum AB, Sydkraft AB, TPS, Termiska Processer AB, Växjö Energi AB.). Stockholm

Stucki, S. (2003): Vom Holz zum Methan. In: Regenerative Kraftstoffe – Entwicklungstrends, F&E-Ansätze, Perspektiven. Fachtagung von Netzwerk Regenerative Kraftstoffe, ZSW und FVS, Stuttgart, S. 101–106

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (1998): Gentechnik, Züchtung und Biodiversität (Autoren: Meyer, R., Revermann, C., Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 55, Bonn

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2002): Maßnahmen für eine nachhaltige Energieversorgung im Bereich Mobilität (Autoren: Grünwald, R., Oertel, D., Paschen, H.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 79, Berlin

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2005a): Grüne Gentechnik – transgene Pflanzen der 2. und 3. Generation (Autor: Sauter, A., unter Mitarbeit von B. Hüsing). TAB-Arbeitsbericht Nr. 104, Berlin

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2005b): Alternative Kulturpflanzen und Anbauverfahren (Autor: Meyer, R.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 103, Berlin

TFZ (Technologie- und Förderzentrum) (2006): Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Straubing, http://www.tfz.bayern.de/, Stand: 22.03.2006

Toyota (2004a): Proceedings 16. International AVL Conference Engine & Environment – Highly-Flexible Classic Powertrain or Hybrid Concept? Graz

Toyota (2004b): Potenziale des Hybridantriebs. Vortrag von Wandt, H.P. In: 2. Klimaschutzkongress NRW: Nachhaltige Mobilität – Technische Innovationen für den Klimaschutz im Verkehr. 04.11.2004, Düsseldorf, http://www.en-consulting.com/2.Klimaschutzkongress-NRW_Vortrag_Hans-Peter-Wandt.pdf, Stand: 04.07.06

Tschatsch, H.-U. (2002): Eine flächendeckende Tankstelleninfrastruktur für Deutschland. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 52(7), S. 494

UBA (Umweltbundesamt) (2003a): CO_2-Minderung im Verkehr – Beschreibung von Maßnahmen und Aktualisierung von Potenzialen. Berlin

UBA (Umweltbundesamt) (2003b): Möglichkeiten zur Reduzierung der Umweltauswirkungen des Flugverkehrs. Berlin, http://www.umweltdaten.de/verkehr/mglemimind.pdf

UBA (Umweltbundesamt) (2003c): Reducing CO_2 emissions in the transport sector (Autoren: Kolke, R. et al.). Berlin

UIC (Internationaler Eisenbahnverband) (2005): Database for energy efficiency technologies and related projects for railways. http://www.railway-energy.org/tfee/index.php?ID=200

Umierski, M. (2004): Pkw-Erdgasantriebe für hohe Leistungsdichte und niedrigste Abgasemissionen. Vortrag auf dem Symposium „Gasfahrzeuge – die passende Antwort auf die CO_2-Herausforderung der Zukunft?“, Berlin

UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) (2005): Biofuels – Advantages and Trade Barriers (Autor: Coelho, S.T.), UNCTAD/DITC/TED/2005/1, Genf

UNEP, Crestar (United Nations Environment Programme, Crestar Capital) (2005): Catalysing Financing Market for Bio-fuel Oils in South India – Biofuel Oil Promotion and Credit Facility. Approach Paper by United Nations Environment Programme – Risoe Centre/Crestar Capital India Private Ltd.

VDI N (VDI Nachrichten) (2005): Hybridauto bietet den Dieseln Paroli. Ausgabe 30/2005

VES (Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie) (2001): Zweiter Statusbericht der Task-Force an das Steering Committee. Unveröffentlichter Bericht

Vielstich, W., Lamm, A., Gasteiger, H. A. (Hg.) (2003): Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications. Vol. 4: Fuel Cell technology and Applications, Part 2, Chichester

VIEWLS (Clear Views on Clean Fuels) (2005): http://www.VIEWLS.org

Vogel, A., Kaltschmitt, M., Bolhar-Nordenkampf, M., Hofbaur, H. (2004): Vergasung zur Kraftstoffbereitstellung – Grundsätzliche konzeptionelle Überlegungen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Biomasse-Vergasung. Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung? Reihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Bd. 24, Münster, S. 268–297

Wagner, U., Igelspacher, R. (2003): Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung und Anwendung von Bioethanol im Verkehrssektor. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München

WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) (2004): Mobilität 2030 – Die Herausforderungen der Nachhaltigkeit meistern. Genf

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2003): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Berlin

WI (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie) (2005): Ökologische Einordnung und strukturell-ökonomischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit anderen Optionen zum Klimaschutz, speziell der Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid bei der Nutzung fossiler Primärenergiequellen (Autoren: Fischedick, M., Schwür, D., Esken, A., Supersberger, N., Nitsch, P., Viebahn, P., Bandi, A., Edenhofer, O.). 1. Zwischenbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Wuppertal u. a. O. 2004, aktualisiert 2005

WI, IE, FHG, GWI (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Institut für Energetik und Umwelt, Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik, Gaswärme-Institut) (2005): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Wuppertal u. a. O.

WWI, GTZ (Worldwatch Institute, Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit) (2006): Biofuels for Transportation: Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century (Autoren: Hunt, S. et al.). Final report for BMELV (in Vorb.)

Yamamoto, H., Yamaji, K., Fujino, J. (1999): Evaluation of bioenergy resources with a global land use and energy model formulated with SD technique. In: Applied Energy 63, S. 101–113

Anhang

1. Tabellenverzeichnis

2. Abbildungsverzeichnis

3. Basisliteratur Kurzcharakterisierung

Argonne 2002

Examining the Potential for Voluntary Fuel Economy Standards in the United States and Canada

Autoren, durchführende Institutionen: Plotkin, S. (Argonne); Greene, D. (Oak Ridge National Laboratory); Duleep, K. G. (Energy and Environmental Analysis, Inc.)

Auftraggeber/Förderinstitution: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (United States Department of Energy) und Natural Resources Canada

Ziele/Gegenstand: Die Studie untersucht für den nordamerikanischen Raum das Potenzial freiwilliger Kraftstoffverbrauchsstandards für PKW und LNF. Neben den Nutzen und Kosten verschiedener Formen von Kraftstoffverbrauchsstandards für den Verbraucher werden auch die Auswirkungen auf die Hersteller diskutiert und bewertet. Grundlage für die Bewertung der Kraftstoffverbrauchsstandards sind Abschätzungen zu den Potenzialen technischer Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs.

Methode: Die Potenziale der technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches werden anderen Veröffentlichungen, (öffentlich geförderten) Studien, Herstellerangaben und Expertenbefragungen entnommen. Dabei ist im Einzelnen nicht nachvollziehbar, welche Quelle für welche Abschätzung herangezogen wird.

- Zeitlicher und geografischer Bezug: USA und Kanada 2015
- Fahrzeugklasse: PKW und LNF
- Referenzfahrzeuge: Modell Neufahrzeug 2000
- Fahrzyklus: FTP (City u. Highway)

CARB 2004

Staff Report: Initial Statement of Reasons for Proposed Rulemaking, Public Hearing to Consider Adoption of Regulations to Control Greenhouse Gas Emissions from Motor Vehicles

Autoren, durchführende Institutionen: California Environmental Protection Agency – California Air Resources Board (CARB)

Auftraggeber/Förderinstitution: s. o.

Ziele/Gegenstand: Die Studie leitet zukünftig mögliche Emissionsstandards für Treibhausgasemissionen aus Fahrzeugen des motorisierten Straßenverkehrs in Kalifornien ab. Die untersuchten Fahrzeuge umfassen kleine und große PKW, „Minivans“ sowie „kleine“ und „große“ LNF. Die Studie identifiziert und bewertet zunächst den Nutzen und die Kosten einzelner technischer Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Durch sinnvolle Kombinationen einzelner Technologien werden mögliche Emissionsstandards abgeleitet und deren Auswirkungen auf die Ökonomie und die Umwelt analysiert.

Methode: Der Fokus der Studie liegt auf der Nutzungsphase der Verkehrsmittel (Tank-to-Wheel). Daten zu technischen Maßnahmen stammen überwiegend aus NESCCAF (2004). Zur Methode und wichtigen Festlegungen siehe dort.

GM 2002

Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study

Autoren, durchführende Institutionen: GM, verschiedene Mineralölfirmen, LBST

Auftraggeber/Förderinstitution: GM

Ziele/Gegenstand: Die Studie versucht zukünftige Kraftstoffe und entsprechende Antriebsstränge zu identifizieren, die das technische und umweltbezogene Potenzial haben, konventionelle Kraftstoffe und Antriebsstränge zu ergänzen und ggf. zu ersetzen. Im Mittelpunkt stehen Energieverbrauch und CO_2-Emissionen. Die untersuchten Antriebsstränge umfassen optimierte konventionelle Systeme, Hybride und Brennstoffzellensysteme.

Methode: Die Gesamtstudie basiert auf dem Konzept der Lebensweganalyse, d. h. analysiert werden die Kraftstofferzeugung und -nutzung vom Bohrloch bis zum Rad/ Auspuff. Die eigentlichen Kraftstoffverbräuche im Fahrzeugbetrieb werden mit einem GM-eigenen Modell berechnet, das nur grob beschrieben ist, aber wahrscheinlich mit dem in GM (2005) verwendeten identisch ist (s. dort). Die Ergebnisse werden als „beste Schätzungen“ mit Fehlerbalken ausgewiesen.

- Zeitlicher und geografischer Bezug: Europa 2010
- Systemgrenze: Gesamtstudie „Bohrloch bis Rad“
- Fahrzeugklasse/-typ: Minivan (Opel Zafira)
- Referenzfahrzeug: Ottomotor mit automatisiertem Schaltgetriebe, reduzierte Fz.-Masse; abgeleitet aus Ottomotor mit manuellem Getriebe, Modelljahr 2002
- Fahrzyklus: NEFZ

GM 2005

Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions

Autoren, durchführende Institutionen: GM, Argonne National Laboratory, Air Improvement Resources

Auftraggeber/Förderinstitution: GM

Ziele/Gegenstand: Die Studie vergleicht die umweltbezogenen Eigenschaften zukünftiger Kraftstoffe und entsprechender Antriebsstränge. Untersucht werden Energieverbrauch, CO_2- und Schadstoffemissionen. Die untersuchten Antriebsstränge umfassen optimierte konventionelle Systeme, Hybride und Brennstoffzellensysteme.

Methode: Die Gesamtstudie basiert auf dem Konzept der Lebensweganalyse, d. h. analysiert werden Kraftstoff-

erzeugung und -nutzung vom Bohrloch bis zum Rad/Auspuff. Die eigentlichen Kraftstoffverbräuche im Fahrzeugbetrieb werden mit einem GM-eigenen Modell berechnet. Das Modell berücksichtigt Wirkungsgrade aller Komponenten des Antriebsstranges. Aus den Anforderungen am Rad – vorgegeben durch den verwendeten Fahrzyklus – wird mit den Wirkungsgraden der einzelnen Komponenten der Kraftstoffverbrauch berechnet. Die Ergebnisse werden als „beste Schätzungen“ mit Fehlerbalken ausgewiesen.

– Zeitlicher und geografischer Bezug: USA 2010
– Systemgrenze: Gesamtstudie „Bohrloch bis Rad“
– Fahrzeugklasse/-typ: Pickup
– Referenzfahrzeug: Ottomotor mit Zylinderabschaltung
– Fahrzyklus: USFTP + HDC

IFEU 2003a/IFEU 2004a

Energy Savings by Light-weighting/Energy Savings by Light-weighting – II

Autoren, durchführende Institutionen: Helms, H.; Lambrecht, U.; Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg

Auftraggeber/Förderinstitution: International Aluminium Institute (IAI)

Ziele/Gegenstand: Die Literaturstudien behandeln Energieeinsparungen durch Gewichtsreduktion in der Nutzungsphase. Die untersuchten Transportmittel umfassen Straßen- und Schienenfahrzeuge sowie Flugzeuge und Schiffe. Durch Harmonisierung der verfügbaren Daten können Leichtbaumaßnahmen an verschiedenen Verkehrsträger verglichen werden.

Methode: Die Literaturstudie harmonisiert und plausibilisiert verfügbare Daten. Neben spezifischen Einsparungen (z. B. pro 100 km) wird auch die typische Nutzungsintensität und -dauer der verschiedenen Fahrzeuge berücksichtigt.

– Systemgrenzen: Nutzungsphase

IFEU 2005b

Energy Savings by Light-weighting for European Articulated Trucks

Autoren, durchführende Institutionen: Helms, H., Lambrecht, U.; Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg

Auftraggeber/Förderinstitution: European Aluminium Association (EAA)

Ziele/Gegenstand: Die Studie präsentiert belastbare Daten für Energieeinsparungen durch Leichtbau bei einem durchschnittlichen europäischen Sattelzug. Neben differenzierten Daten für spezielle Fahrsituationen, Steigungen etc. werden auch durchschnittliche Einsparungen für Deutschland ermittelt.

Methode: Differenzierte Modellierung mit dem PHEM-Modell der Technischen Universität Graz.

– Zeitlicher und geografischer Bezug: Europa 2004
– Systemgrenzen: Nutzungsphase
– Fahrzeugtyp: Sattelzug (40 t)
– Referenzfahrzeug: EURO III Fahrzeug
– Fahrzyklen: Zyklen des „Handbuchs Emissionsfaktoren“

Kolke 2004

Vergleich der Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Straßenverkehr

Autor, durchführende Institutionen: Kolke, R.

Auftraggeber/Förderinstitution: –

Ziele/Gegenstand: Die Studie vergleicht die Umwelteigenschaften neuer Antriebe und neuer Kraftstoffe. Untersucht werden Energieverbrauch, CO_2- und Schadstoffemissionen, Flächenverbrauch und Lärmbelastung sowie Kosten. Die untersuchten Antriebsstränge umfassen optimierte konventionelle Systeme, Hybride und Brennstoffzellensysteme.

Methode: Die Gesamtstudie basiert auf dem Konzept der Lebensweganalyse, d. h. analysiert werden Kraftstofferzeugung und -nutzung vom Bohrloch bis zum Rad/Auspuff. Außerdem wird die Fahrzeugproduktion erfasst. Die eigentlichen Kraftstoffverbräuche im Fahrzeugbetrieb werden mit einem einfachen Modell berechnet. Wesentliche Inputgrößen sind mittlere Wirkungsgrade im Fahrzyklus und Fahrzeugmasse. Der Verbrauch wird iterativ im Abgleich mit der Masse berechnet (über die Sollreichweite bestimmt der Verbrauch die Gesamtfahrzeugmasse mit).

– Zeitlicher und geografischer Bezug: D 2010
– Systemgrenze: Gesamtstudie „Bohrloch bis Rad“ (Kraftstoffe), Fz.-Herstellung
– Fahrzeugklasse/-typ: Kleinwagen (Poloklasse)
– Referenzfahrzeug: Ottomotor; orientiert an typischen Fahrzeugen des Modelljahres 2003
– Fahrzyklus: NEFZ, außerdem Angaben zu modellierten Fahrmustern (innerorts, außerorts, Autobahn)

MIT 2003b

The Performance of Future ICE and Fuel Cell Powered Vehicles and Their Potential Fleet Impact

Autoren, durchführende Institutionen: MIT

Auftraggeber/Förderinstitution: –

Ziele/Gegenstand: Die Studie vergleicht zukünftige PKW mit VKM und Brennstoffzelle hinsichtlich Verbrauch, CO_2-Emissionen und Kosten. Die untersuchten Antriebsstränge umfassen optimierte konventionelle Systeme, Hybride und Brennstoffzellensysteme. Die fahrzeugspezifischen Daten werden in Szenarien implementiert und die Ergebnisse diskutiert.

Methode: Die Gesamtstudie basiert auf dem Konzept der Lebensweganalyse, d. h. analysiert werden Kraftstofferzeugung und -nutzung vom Bohrloch bis zum Rad/Auspuff. Außerdem werden die Fahrzeugproduktion sowie die Entsorgung nach Ende der Nutzungsphase erfasst. Die eigentlichen Kraftstoffverbräuche im Fahrzeugbetrieb werden mit einem Modell berechnet, das die Wirkungsgrade aller Komponenten des Antriebsstranges berücksichtigt. Aus den Anforderungen am Rad – vorgegeben durch den verwendeten Fahrzyklus – wird mit den Wirkungsgraden der einzelnen Komponenten der Kraftstoffverbrauch berechnet. Wichtige Randbedingungen:

– Zeitlicher und geografischer Bezug: USA 2020
– Systemgrenze: Gesamtstudie „Bohrloch bis Rad“; inkl. Fahrzeugproduktion und -entsorgung
– Fahrzeugklasse/-typ: amerikanischer Mittelklasse-PKW
– Referenzfahrzeug: Ottomotor; „Reference“: Modelljahr 2001; „Baseline“ („100 Prozent“): abgeleitet aus Modelljahr 2001
– Fahrzyklus: Combined Federal Cycles (55 % urban (USFTP), 45 % highway (HWY)

NESCCAF 2004

Reducing Greenhouse Gas Emissions from Light-Duty Motor Vehicles

Autoren, durchführende Institutionen: Cooper, C. (NESCCAF), Meszler, M. (Meszler Engineering Services), Brueckner, S. (AVL Powertrain Engineering)

Auftraggeber/Förderinstitution: Northeast States Center for a Clean Air Future (NESCCAF)

Ziele/Gegenstand: Die Studie identifiziert zukünftig mögliche technische Maßnahmen zur kosteneffizienten Reduktion von Treibhausgasemissionen aus dem motorisierten Straßenverkehr. Neben Einzelmaßnahmen werden auch sinnvolle Technologiekombinationen und deren Kosten betrachtet.

Methode: Der Fokus der Studie liegt auf der Nutzungsphase der Verkehrsmittel (Tank-to-Wheel). Die Treibhausgasreduktionspotenziale verschiedener Technologien werden auf Basis von Referenzfahrzeugen aus Simulationen gewonnen (Simulationsmodell: CRUISE der Firma AVL). Neben Einzeltechnologien werden auch Konfigurationen mehrerer sinnvoll kombinierbarer Einzeltechnologien untersucht.

– Zeitlicher und geografischer Bezug: USA 2009–2012
– Fahrzeugklassen: kleine und große PKW, „Minivans“ sowie „kleine“ und „große“ LNF
– Referenzfahrzeuge: Für jede Fahrzeugklasse werden Fahrzeuge modelliert, die dem Flottendurchschnitt dieser Klasse im Jahr 2002 entsprechen.
– Fahrzyklus: FTP 75 + HWY+ Mix

OECD/IEA 2005

Making Cars More Fuel Efficient

Autoren, durchführende Institutionen: European Conference of Ministers of Transport (ECMT); International Energy Agency (IEA)

Auftraggeber/Förderinstitution: Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD)

Ziele/Gegenstand: Analyse von Technologien die zu einer Reduktion des Verbrauchs im realen Fahrverhalten, nicht jedoch in Testzyklen führen. Diese Technologien werden bislang von Fahrzeugherstellern nur wenig genutzt. Es sollen Informationen für Entscheider bereitgestellt werden und Anreize für eine Förderung dieser Technologien gegeben werden. Die Studie berücksichtigt neben verschiedenen Antriebstechnologien auch Luft- und Rollwiderstand.

Methode: Literaturstudie

– Zeitlicher und geografischer Bezug: OECD-Länder
– Systemgrenzen: Nutzung
– Fahrzeugtyp: PKW

RAND Europe et al. 2003

Preparation of Measures to Reduce CO_2 Emissions from N1 Vehicles

Autoren, durchführende Institutionen: Lu, C. et al. (RAND Europe), Neunzig, D. (FKA), De Ceuster, G. (Transport and Mobility Leuven)

Auftraggeber/Förderinstitution: European Commission (Environmental Directorate-General)

Ziele/Gegenstand: Die Studie identifiziert technologische und politische Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen für N1-Kraftfahrzeuge (LNF mit einem zulässigen Gesamtgewicht ≤ 3,5 t). In mehreren Szenarien werden die Nutzen und die Kosten für verschiedene Technologiekombinationen abgeschätzt.

Methode: Die Potenziale der technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches basieren auf Abschätzungen in anderen Veröffentlichungen. Somit ist kein Referenzfahrzeug definiert und der Vergleich verschiedener Technologien aufgrund unterschiedlicher Quellen und Randbedingungen nur beschränkt möglich.

– Zeitlicher und geografischer Bezug: Europa 2010–2015
– Fahrzeugklasse: LNF ≤ 3,5 t
– Fahrzyklus: NEFZ

Ricardo 2003

„Carbon to Hydrogen“ Roadmaps for Passenger Cars: Update of the Study for the Department for Transport and the Department of Trade and Industry

Autoren, durchführende Institutionen: Owen, N., Gordon, R., Ricardo Consulting Engineers

Auftraggeber/Förderinstitution: Ministerien für Transport und für Handel und Industrie/UK

Ziele/Gegenstand: Die Studie untersucht Optionen zur Reduktion der CO_2-Emissionen von PKW durch Verbesserungen der Fahrzeugtechnik einschließlich der Wechselwirkungen mit neuen Kraftstoffen aus der Perspektive der eigentlichen Fahrzeugtechnik. Die untersuchten Technologien sind dabei in zwei Strategien (Low Carbon, Hydrogen Priority) auf Zeitskalen angeordnet (Verfügbarkeit für den Massenmarkt). Untersucht werden Energieverbrauch, CO_2-Emissionen und Kosten. Die untersuchten Antriebsstränge umfassen optimierte konventionelle Systeme, Hybride und Brennstoffzellensysteme.

Methode: k. A.

- Zeitlicher und geografischer Bezug: Europa 2003 bis 2020 bzw. 2030
- Systemgrenze: Gesamtstudie „Bohrloch bis Rad“
- Fahrzeugklasse/-typ: Mittelklasse-PKW
- Referenzfahrzeug: Mix aus sieben Diesel-PKW mit Schaltgetrieben des Modelljahres 2003
- Fahrzyklus: k. A.

DoE 2000

Technology roadmap for the 21st Century Truck Program

Autoren, durchführende Institutionen: Verschiedene öffentliche und industrielle Forschungsbetriebe

Auftraggeber/Förderinstitution: US Department of Energy

Ziele/Gegenstand: Das „21st Century Truck Program“ basiert auf einer Partnerschaft zwischen den US-Herstellern von LKW und Bussen und der US-Bundesregierung. Das Ziel der Initiative ist die Entwicklung von Technologien, die den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen kommerzieller KFZ reduzieren. Die Reduktion der verschiedenen Fahrwiderstände ist dabei ein wichtiger Faktor.

Methode: Beschreibung von Prototypen zur Entwicklung neuer Technologien unter Beteiligung von Experten der Hersteller

- Zeitlicher und geografischer Bezug: USA 2010
- Systemgrenzen: Nutzung
- Fahrzeugtyp: LKW und Busse

Kraftstoffmatrix 2004

Bericht der Unterarbeitsgruppe „Kraftstoffmatrix“ zum Matrixprozess

Autoren/durchführende Institutionen: Die Arbeitsgruppe bestand aus folgenden Mitgliedern: Mitglieder der VES, Verband der deutschen Automobilindustrie, dem IFEU, dem Institut für Energetik und Umwelt, der Dena, dem Mineralölwirtschaftsverband, dem Umweltbundesamt, der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, dem Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurswesen, TU Freiberg, der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik

Auftraggeber/Förderinstitution: Bundesregierung

Ziele/Gegenstand: Im Rahmen der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie hat die Bundesregierung unter Federführung des BMVBW vor dem Hintergrund internationaler Entwicklungen ein Strategiekonzept zur Markteinführung alternativer/regenerativer Kraftstoffe für den Zeithorizont bis 2020 vorgestellt („Kraftstoffstrategie“). Sie stützt sich dabei auf einen Bewertungsprozess (sog. „Matrixprozess“), der von einer interdisziplinären Expertengruppe im Auftrag der Bundesregierung im Laufe des Jahres 2003/2004 durchgeführt wurde.

Methode: Im Rahmen dieses Prozesses ist von einer Expertengruppe ein Bericht erarbeitet worden, dem angeschlossen Kraftstoffverwendungsmatrizen für die Jahre 2010 und 2020 entwickelt wurden. Darin sind die einzelnen Kraftstoffpfade bewertet worden nach „Pfad sinnvoll?“, „Abschätzung technisches Minderungspotenzial“ und „Abschätzung Mengenpotenzial der Treibhausgasemissionen“.

- Zeitlicher und geografischer Bezug: D 2002, 2010, 2020
- Betrachtete Kraftstoffe: alle theoretisch möglichen konventionellen und alternativen Kraftstoffe
- Betrachtete Parameter: Treibhausgasemissionen in g/km für 2002, 2010 und 2020, die Bereitstellungskosten und Informationen zu Infrastruktur und Antriebsstrang

CONCAWE 2003

Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels andPpowertrains in the European Context. WELL-to-TANK Report, Version 1

Autoren, durchführende Institution bzw. Auftraggeber/Förderinstitution: Diese Studie ist in Zusammenarbeit von europäischen Automobilherstellern EUCAR, von der Europäischen Ölindustrie CONCAWE und dem Forschungszentrum der Europäischen Kommission JRC bzw. IES, dem Institut für Umwelt und Nachhaltigkeit des JRC, unter Mithilfe der L-B-Systemtechnik und dem Institut Français Pétrol erstellt worden.

Ziel/Gegenstand: Schaffung einer EU-15-einheitlichen und breit akzeptierten Datengrundlage.

Methode: Die Berechnungen erfolgten über ein von der LBST entwickeltes Softwareprogramm. Die Kraftstoffpfade wurden für die EU-15 betrachtet mit dem Zeithorizont 2010. Die Berücksichtigung von Kuppelprodukten erfolgt über Allokation. Die Daten sind für die einzelnen Prozessschritte aufgeschlüsselt im Anhang angegeben.

- Zeitlicher und regionaler Bezug: EU-15 2010
- Betrachtete Kraftstoffe: konventionelle und alternative Kraftstoffe
- Betrachtete Parameter: Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen

IFEU 2004b

CO_2-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme

Autoren, durchführende Institution: Quirin, M., Reinhardt, G. A., Gärtner, S. O., Pehnt, M., IFEU

Auftraggeber/Förderinstitution: Gefördert durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschienen e.V. (FVV), der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.

Ziel/Gegenstand: Ermittlung des Forschungsbedarfs bezüglich Biokraftstoffe.

Methode: Es wurden alle international öffentlich zugänglichen Publikationen zu allen bereits im Einsatz befindlichen und potenziell zukünftigen Biokraftstoffen analysiert und miteinander verglichen. Aus den betrachteten Studien wurden der Primärenergieverbrauch und die THG-Emissionen entnommen für die Bereitstellung bis in den Tank (WtT); für die Fahrzeugnutzung sowie allgemeine Kraftstoffeigenschaften wurden in der Studie einheitliche Werte festgelegt. Als Datenbasis dient CONCAWE (2003). Es wurden nicht die Variabilität der einzelnen Studien als Bandbreiten angegeben, da Ergebnisse einzelner Studien nicht als repräsentativ eingestuft werden können (weil beispielsweise Kuppelprodukte nicht angerechnet wurden oder der Düngemittelbedarf als zu hoch eingeschätzt wurde, aufgrund der Berücksichtigung menschlicher Arbeit und von Basisdaten, die nicht mehr den Stand der Technik widerspiegeln, oder bei Nichtberücksichtigung agrarischer Referenzsysteme), sondern durch Anpassung, Neuberechnungen und gegebenenfalls Neueinschätzung abgeleitet werden, die die Einschätzung der Autoren widerspiegeln. Der Bezugsraum ist nicht auf Deutschland beschränkt.

– Zeitlicher und regionaler Bezug: 2010
– Betrachtete Kraftstoffe: Biokraftstoffe
– Betrachtete Parameter: Schwerpunkt auf Energie- und Treibhausgasbilanzen, Versauerung, Eutrophierung, Photosmog und Ozonabbau werden qualitativ betrachtet, Kosten- und Mengenpotenziale

ÖKO-Institut 2004b

Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse

Autoren, durchführende Institution: Fritsche, U., Jenseits, W., Dehoust, G., Hünecke, K., Rausch, L., Schüler, D., Wiegmann, K. (Öko-Institut), Heinz, A., Hiebel, M., Ising M., Kabasci, S., Unger, Ch. (Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik), Thrän, D., Fröhlich, N., Scholwin, F. (Institut für Energie und Umwelt gGmbH), Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A. (Institut für Energie und Umweltforschung), Baur, F., Bemmann, U., Groß, B., Heib, M., Ziegler C. (Institut für Zukunftsenergiesysteme), Flake M., Schmehl M., (TU Braunschweig), Simon S. (TU München)

Auftraggeber/Förderinstitution: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Ziel/Gegenstand: Entwicklung eines Analyseinstruments zur Bewertung von Biomasse

Methode: Auf Basis von Literaturstudien des Bearbeiterteams (v. a. IFEU, IE Leipzig und Öko-Institut) wurden komplette Daten für die Vorketten von Biokraftstoffen generiert, die unter anderem den fossilen Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen beinhalten. Es wurden explizite Lernkurven für Biomassetechnologien (wie auch für konventionelle fossile Systeme) einbezogen, die Umwelt-, Effizienz- und Kostendaten betreffen. Die Datensätze wurden einem internen Reviewprozess durch das Bearbeiterteam unterzogen.

– Zeitlicher und regionaler Bezug: D 2000, 2010, 2020 und 2030
– Betrachtete Kraftstoffe: Biokraftstoffe
– Betrachtete Parameter: u. a. Primärenergieverbrauch, Treibhausgasemissionen, Kosten

VIEWLS 2005

Clear Views on Clean Fuels

Autoren, durchführende Institution: Leitung von NOVEM mit 19 europäischen und nordamerikanischen Partnern

Auftraggeber/Förderinstitution: Europäische Kommission

Ziel/Gegenstand: Bereitstellung einer Informationsbasis als Entscheidungshilfe, welche Strategien von jedem Staat genau ergriffen werden müssen, um die Produktion und den Verbrauch von Biotreibstoffen in Europa zu erhöhen.

Methode: Zusammenstellung über Studien zu den Themen Umwelt, Kosten und Potenziale von Biokraftstoffen, die über http://www.viewls.org verfügbar sind. Energie- und Treibhausgasbilanzen und Kosten zu Biokraftstoffen wurden ausgewertet und mit den entsprechend in der Literatur enthaltenen Bandbreiten für den Zeitraum vor und nach 2010 als WtW angegeben.

– Zeitlicher und regionaler Bezug: zwei Zeiträume, vor und nach 2010
– Betrachtete Kraftstoffe: neun Biokraftstoffe
– Betrachtete Parameter: Energie- und Treibhausgasbilanzen, Kosten, Potenziale

4. CO_2-Sequestrierung bei der Wasserstofferzeugung

Die zentralen Elemente für eine Technologie der CO_2-Abtrennung und Deponierung (Sequestrierung) sind:

– Abscheidung des CO_2 aus dem Synthesegas und Komprimierung,
– Transport des abgetrennten CO_2 zu den Speicherstätten,
– langfristige Deponierung.

Mit Ausnahme der langfristigen Deponierung werden die benötigten Einzeltechnologien in anderen Industriebereichen bereits angewendet, sodass sie prinzipiell verfügbar wären. Erhebliche Herausforderungen bestehen jedoch hinsichtlich der Integration zu einer funktionsfähigen lo-

gistischen Kette bezüglich der wirtschaftlichen Parameter sowie in Bezug auf Umwelt-, Sicherheits- und Akzeptanzfragen (EK 2002, IPCC 2005).

CO_2-Abtrennung

Im Fall der Wasserstofferzeugung muss aus dem wasserstoffreichen Synthesegas, das durch die Kohlevergasung bzw. Dampfreformierung erzeugt wird, das CO_2 abgeschieden werden, um den Wasserstoff in einer ausreichenden Reinheit zu erzeugen. Vorteil bei der CO_2-Sequestrierung im Rahmen der Wasserstoffherstellung ist damit, dass die Abscheidung keinen zusätzlichen Verfahrensschritt darstellt, also keine zusätzlichen Kosten verursacht.

Für die Abtrennung der CO_2-Anteile aus dem Synthesegas werden grundsätzlich vor allem die folgenden Technologien diskutiert und erprobt:

– die Absorption,

– die Adsorption und

– die Separation mittels Membranen.

Bei hohen Partialdrücken von CO_2 wird die Absorption im Allgemeinen an Lösemitteln durchgeführt. Alternativ kann das CO_2 auch an Festkörpern wie Zeolithen oder Aluminium- und Silicagelen adsorbiert werden. Die Regeneration der Adsorbentien erfolgt in der Regel über eine Druckreduktion (Pressure Swing Adsorption, PSA) in der Adsorptionsanlage. Eine neue Technologievariante ist die Abtrennung von CO_2 mittels Membranen. Allerdings besteht noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die Selektivität und Robustheit der Membranen so weit zu optimieren, dass das CO_2 mit einer akzeptablen Abscheiderate abgetrennt werden kann. Für den Transport muss das abgeschiedene CO_2 zusätzlich verdichtet werden, wobei Drücke von 8 bis 12 MPa für den Transport an Land und Drücke von etwa 20 MPa für den Offshore-Transport notwendig sind (WI 2005).

Transport von CO_2

Für den Transport des abgetrennten CO_2 kommen alle für den Gastransport üblichen technologischen Varianten in Betracht. Dies wären vor allem der Transport über Pipelines oder in Tanks auf LKW oder Schiffen. Erfahrungen für den Transport in Tanks bestehen bisher kaum, der Pipelinetransport ist, z. B. in den USA, bereits gängige Praxis (WI 2005).

Vorteil bei der Herstellung von Wasserstoff ist, dass grundsätzlich die Anlagen direkt am Ort der Förderung von beispielsweise Erdgas errichtet werden können und das abgetrennte CO_2 direkt wieder in die Speicherformation injiziert werden kann. Damit entstehen praktisch keine Transportwege zu den Lagerstätten. Dafür muss aber unter Umständen im Gegenzug der produzierte Wasserstoff über längere Strecken transportiert werden.

Deponierung von CO_2

Als Anforderungen an die CO_2-Speicher ergeben sich die folgenden Aspekte (EK 2002; Herzog/Golomb 2004):

– hohe Speichersicherheit über mehrere zehntausend Jahre und Vermeidung von Leckagen,

– Vermeidung von zusätzlichen Sicherheitsrisiken (vor allem schlagartige Freisetzung großer CO_2-Mengen mit hohem Gefährdungspotenzial),

– keine ökologisch kontraproduktiven Auswirkungen (gravierende Veränderungen von Ökosystemen, Grundwasserbelastungen),

– Vermeidung von (heutigen und zukünftigen) Nutzungskonflikten (Deponieräume, weitere Ausbeutung von Lagerstätten),

– minimierte Kosten von Transport zu den Speicherstätten und der Speicherung selbst.

Grundsätzlich stehen die Deponierung in geologischen Formationen wie Salzstöcken, tiefen Kohleflözen, ausgeförderten Gas- und Ölfeldern, tiefen salinen Aquiferen und Grundwasserspeichern zur Debatte. Auch wird die CO_2-Deponierung im Meer diskutiert, wobei aber aufgrund bisheriger Untersuchungen entscheidende Bedenken in Bezug auf die Speichersicherheit und die erheblichen ökologischen Probleme der CO_2-Speicherung im Ozean bestehen (wie die Versauerung des Meerwassers und die direkte Toxizität hoher CO_2-Konzentrationen auf marine Organismen) (EK 2002). Eine interessante Option stellt die Lagerung in ausgeförderten Ölfeldern dar. Wenn die Öl- und Erdgasvorräte zur Neige gehen, werden verschiedene Verfahren eingesetzt, die unter dem Begriff „Enhanced Oil Recovery“ (EOR) zusammengefasst werden. Hierbei wird ein inertes Gas oder Wasserdampf in die Fördereinheit gepumpt, sodass durch den entstehenden Überdruck das Öl bzw. Erdgas aus der Lagerstätte ausgetrieben wird. Vorteil ist, dass die Kosten durch das zusätzlich geförderte Erdöl/gas gesenkt werden können, die Hohlräume gewissermaßen geprüfte Lagerstätten sind, da sie bereits für Millionen von Jahren Flüssigkeiten oder Gase gespeichert hatten, und diese Lagerstätten eine gut bekannte Geologie haben (IEA 2001). Im Jahr 2000 gab es bereits 84 kommerzielle und FuE-Projekte, die Kohlendioxid zur EOR nutzten (Herzog/Golomb 2004).

Diejenigen Optionen, bei denen die Speicherqualität heute als weitgehend gesichert gelten kann und wirtschaftlich attraktiv erscheinen (Öl- und Gasfelder, Kohlebergwerke), haben eine relativ geringe Kapazität und lassen Probleme der Nutzungskonkurrenz (Untertagespeicherung, anhaltende Förderung, zukünftige Wiederaufnahme der Förderung) oder gravierende Umwelt- und Sicherheitsprobleme (stillgelegte Kohlebergwerke) erkennen (EK 2002). Für diejenigen Optionen mit potenziell großen Speicherkapazitäten (Kohleflöze, salinare Aquifere) sind noch eine Vielzahl von grundsätzlichen Fragen (vor allem der Speicherqualität, Folgen von Druckerhöhungen, des Austauschverhaltens der an der Kohle adsorbierten Gase und der Permeabilität der Kohle) sowie eine ganze Reihe technischer Probleme zu lösen (EK 2002; WI 2005). Das erste Projekt im kommerziellen Maßstab zur geologischen CO_2-Deponierung ist das sogenannte Sleipner-Projekt. Hier wird das bei der Erdgasförderung anfallende CO_2 abgeschieden und in einem salinen Aquifer gespeichert. Weitere Großprojekte sind unter anderem das Weyburn-EOR-Projekt in Kanada und ein Projekt zur CO_2-Deponierung in einem Erdgasfeld in In Salah in Algerien. Eine ausführliche Zusam-

menstellung der in diesem Zusammenhang durchgeführten Projekte findet sich in WI (2005).

Mit einer Pressemitteilung vom 6. Juli 2005[45] kündigt der Energiekonzern BP die Planungsphase für ein Projekt zur Produktion von kohlendioxidfreiem Wasserstoff an. Hier soll der Wasserstoff aus Erdgas erzeugt werden und das abgetrennte Kohlendioxid zur Ölförderung und zur endgültigen Lagerung in die Öllagerstätten in der Nordsee geleitet werden. Bis Ende 2006 wird die Wirtschaftlichkeit geprüft; ausgegangen wird von einer möglichen Inbetriebnahme im Jahr 2009.

[45] Pressemitteilung vom 6. Juli 2005: „BP plant Kraftwerk mit 90 Prozent weniger Emissionen", http://www.deutschebp.de/genericarticle.do?categoryId=2010149&contentId=7007117

Speicherkapazitäten in Deutschland

In der Tabelle 64 sind die nach EK (2002) für Deutschland ausgewiesenen Speicherkapazitäten der einzelnen Speichertypen inklusive ihrer Vor- und Nachteile angegeben.

Auf europäischer Ebene stehen insbesondere durch die umfangreichen Möglichkeiten der Einlagerung in Erdgas-

Tabelle 64

Optionen für die CO_2-Speicherung in Deutschland

Speichertyp	CO_2-Speicherkapazität in Deutschland	Vorteile	Nachteile
stillgelegte Salzbergwerke	Hohlraumvolumen entspricht 30 Mt CO_2	sehr dichte Barriere hohe CO_2-Dichte in geringer Tiefe	Sicherheitsrisiken: – Schachtabdichtung – Hohlraumspeicherung Nutzungskonflikt mit Untertagedeponierung, hohe Kosten
stillgelegte Kohlebergwerke	Hohlraumvolumen entspricht 15 % der abgebauten Flöze bis zu 780 Mt CO_2	Nähe zu großen Emittenten	Sicherheitsrisiken: – Schachtabdichtung – Hohlraumspeicherung – Altbergbau – Deckgebirge aktiver Bergbau in Verbundbergwerken, Nutzungskonflikt Grubengasnutzung
tiefe Kohleflöze	Flözvolumen entspricht 21.600 ± 420 Mt CO_2, Bergbaugebiete ausgenommen 17.300 Mt CO_2 effektiv 3.100–8.300 Mt CO_2	Nähe zu großen Emittenten, Ausbeutesteigerung bei Flözgasproduktion, potenziell niedrige Kosten	niedrige Injektionsraten in gering durchlässiger Kohle, Beeinträchtigung der zukünftigen Nutzung von Lagerstätten, Technologie nur teilweise erprobt
ausgeförderte Ölfelder > 5 Mio. t kumulative Ölförderung	kumulative Produktion entspricht 81 Mt CO_2 einschließlich Reserven 110 Mt CO_2	Steigerung der Ölausbeute und Kosteneinsparungen gegenüber anderen EOR-Technologien, Speicherqualität gegeben, industrielle Praxis, geringe Explorationskosten	geringe Lagerstättengrößen andauernde Ölförderung „CO_2-Kontamination" der Lagerstätten in Bezug auf zukünftige Lagerstättenausbeutung (z. B. bei höheren Preisen)
ausgeförderte Gasfelder > 2 Mio. Nm³ kumulative Gasförderung	kumulative Produktion entspricht 1.770 Mt CO_2 einschließlich Reserven 2.560 Mt CO_2	Erhöhung der Gasförderung in der Endphase der Produktion theoretisch möglich, Speicherqualität gegeben	andauernde Erdgasförderung „CO_2-Kontamination" der Lagerstätte in Bezug auf zukünftige Lagerstättenausbeutung (z. B. bei höheren Preisen)
tiefe saline Aquifere	insgesamt groß (> 16.000 Mt CO_2) effektiv kleiner	weite Verbreitung, langfristige Fixierung von CO_2 in Karbonaten	Nutzungskonflikt mit geothermischer Energiegewinnung, Speicherqualität weitgehend unbekannt

Quelle: EK 2002

und Erdöllagerstätten (vor allem Großbritannien, Niederlande, Norwegen) erhebliche CO_2-Speicherkapazitäten zur Verfügung. Allein die Optionen in den Niederlanden erscheinen jedoch angesichts der Transportentfernungen für die deutsche Energiewirtschaft als mittelfristig interessant (EK 2002).

Risiken

Grundsätzlich besteht das Risiko von Kohlendioxidemissionen. Hierbei werden zwei Szenarien unterschieden:

– Schlagartig auftretende Emissionen, bei denen plötzlich auch größere Mengen von CO_2 aus den Lagerstätten austreten. Da CO_2 schwerer ist als Luft, könnte dabei in Bodennähe die Luft verdrängt werden, sodass die erhöhte Kohlendioxidkonzentration eine unmittelbare Gefahr für das Leben und die Gesundheit der Menschen darstellt (WBGU 2003). Diese Art der Risiken von CO_2-Speicherung können mit den für die Öl- und Gasindustrie technischen und administrativen Mechanismen kontrolliert werden.

– Schleichende Emissionen, bei denen CO2 durch unentdeckte Mängel oder Brüche, an Verwerfungslinien, Klüften und Schwächezonen im Gestein schleichend und diffus an die Oberfläche gelangt. Bei dieser Art von Leckagen kann es zur Versauerung der Böden und des Grundwassers kommen. Bei der Speicherung in Gesteinsformationen und Aquiferen kann durch die Versauerung des Wassers das umliegende Gesteinsmaterial angegriffen werden und so Veränderungen in den Böden hervorrufen. Wenn diese schleichenden CO_2-Verluste unentdeckt bleiben und die Konzentration ansteigt, kann auch diese Art der Leckage Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch und Tier haben.

Auch seismotektonische Bewegungen können die Dichte von Speichern beeinflussen und Aufstiegswege für das Gas ermöglichen. Erdbebengefährdete Regionen müssen daher für eine Deponierung besonders kritisch geprüft werden (WBGU 2003).

Die Treibhausgaswirkung von Kohlendioxid muss bei der Kohlendioxiddeponierung selbstverständlich auch mit in Betracht gezogen werden. Selbst wenn es nur zu geringen Kohlendioxidemissionen aus den Lagerstätten kommt, summiert sich dies über die Jahre der Speicherung und es kann zu einem nennenswerten Beitrag zum Klimawandel kommen.

Kosten

Es gibt nur wenige Erfahrungen mit der Kombination von CO_2-Abscheidung, Transport und Speicherung. Während einzelne Komponenten bereits eingesetzt werden, fehlt noch jegliche Erfahrung mit dem Gesamtsystem und vor allem mit großen Mengen an Kohlendioxid. Daher variieren die angegebenen Kosten in der Literatur stark. Abhängig sind die Kosten von dem Anlagentyp, der Transportentfernung und -art, und dem Typ und der Charakteristik der Speicherung. Die CO_2-Abscheidung einschließlich der Komprimierung des CO_2 macht den größten Anteil der Gesamtkosten für eine CO_2-Sequestrierung aus und ist mit etwa drei Vierteln der kostenbestimmende Schritt (WBGU 2003).

In IPCC (2005) werden Kosten differenziert nach den einzelnen Komponenten angegeben (Tabelle 65).

Tabelle 65

Kosten der CO_2-Sequestrierung

Prozessschritt	Bandbreite der Kosten	Bemerkungen
Abscheidung bei der Wasserstoff- oder Ammoniakherstellung	5–55 US-Dollar/t CO_2 netto abgeschieden	nur gültig bei hoch reinen Quellen, nur Trocknung und Komprimierung
Transport	1–8 US-Dollar/t CO_2 transportiert	pro 250 km Pipeline oder Verschiffung für Massendurchflüsse von 5 (hoher Wert) bis 40 (niedriger Wert) Mt CO_2/a
geologische Speicherung	0,5–8 US-Dollar/t CO_2 injiziert	ohne mögliche Gutschriften durch EOR
geologische Speicherung: Monitoring und Prüfung	0,1–0,3 US-Dollar/t CO_2 injiziert	
Ozeanspeicherung	5–30 US-Dollar/t CO_2 injiziert	inklusive 100–500 km Offshore-Transport, ohne Monitoring und Prüfung

Quelle: Öko-Institut 2005a, frei nach IPCC 2005

Mit einer Gutschrift für das durch die Injektion zusätzlich geförderte Erdöl oder Erdgas können die Kosten gesenkt werden. Auch können bei einer breiten Anwendung und technologischen Innovationen sicherlich Kostenreduktionen erzielt werden, die sich jedoch derzeit noch nicht quantifizieren lassen. Aufgrund der geringen Größe der deutschen Erdölfelder kommen nach WI (2005) für Deutschland nur die Erdgasfelder, die Kohleflöze und die Aquifere in Betracht. Für diese Speicheroptionen werden in WI (2005) mit Verweis auf BMWA (2003) Speicherkosten von 4 bis 6 Euro/t CO_2 angegeben.

Ein Kostenvergleich von Benzin, Diesel und Erdgas mit CO_2-frei erzeugtem Wasserstoff in WI (2005) zeigt, dass dieser etwa 50 bis 125 Prozent teurer ist als die herkömmlichen Kraftstoffe (Benzin/Diesel 8 bis 10 Euro/GJ_{HHV}; H_2 Erdgas: 12 bis 18 Euro/GJ_{HHV}; H_2 Kohle 13 bis 18 Euro/GJ_{HHV}; H_2 Biomasse 14 bis 25 Euro/GJ_{HHV}).

Noch ist eine Vielzahl von Forschungsarbeiten notwendig, in denen neben technischen Fragen und dem Potenzial auch die Nachhaltigkeit (einschließlich Kosten, Sicherheit, Umweltverträglichkeit und Akzeptanz) näher analysiert wird. Belastbare Ergebnisse hierzu können mit einem Zeithorizont von ungefähr zwei Dekaden erwartet werden. Wenn sich für die CO_2-Deponierung in Deutschland Potenziale von etwa 100 Mio. t CO_2 jährlich für mehrere Dekaden als belastbare Größe erweisen, kann dieser Pfad angesichts einer dann deutlich weniger intensiven Nutzungskonkurrenz eine Wasserstoffstrategie für den Verkehrssektor deutlich attraktiver machen bzw. neben dem Erdgaseinsatz ein wichtiges Element für eine mittelfristige Übergangsstrategie bilden. Vor dem Hintergrund des aktuellen Erkenntnis- und Diskussionsstandes kann hierzu jedoch keine belastbare Aussage getroffen werden. Gerade die Akzeptanzaspekte der CO_2-Deponierung werden für die auf der Nutzerseite ebenfalls sehr sensible Einführung eines neuen Kraftstoffs eine hohe Rolle spielen müssen.

5. WTW Grunddaten für die Quantifizierung

Quantifizierung – Anteile an Neuzulassungen und spezifische Reduktionen

Die ausgewählten Reduktionsmaßnahmen bzw. -maßnahmenbündel sowie die angenommenen Relationen (<, =, >) der verschiedenen Fahrzeugklassen (Otto- und Diesel-Pkw, jeweils klein, mittel, groß – k, m, g), Fahrzyklen (Innerorts- und Außerortsteil des NEFZ – io, ao) und Bezugsjahre werden im Folgenden kurz skizziert. Diese Annahmen liegen den Abschätzungen der Werte in Tabelle 66 zugrunde.

EURO 5

Anteile: alle 100 Prozent
Zusatzverbrauch: io = ao, 2010 = 2020
Otto-Pkw: k = m = g; Diesel-Pkw: k < m = g (Diesel k = Otto-Pkw)

Allgemeine Motorenentwicklung

Anteile: alle 100 Prozent
Reduktion: Otto < Diesel, k = m = g, io = ao, 2010 < 2020

Reduktion des Fahrzeuggewichts inkl. Sekundäreffekten

Anteile: Otto = Diesel, k = m = g außer 2020: k > m = g, 2010 < 2020
Reduktion: k = m = g, io = ao, Otto = Diesel, 2010 < 2020

Reduktion des Rollwiderstands

Anteile: Otto = Diesel, k = m = g, 2010 < 2020
Reduktion: Otto = Diesel, k = m = g, io > ao, 2010 < 2020

Reduktion des Luftwiderstands um 10 Prozent bzw. 30 Prozent

Reduktion des Luftwiderstands um 10 Prozent
Anteile: alle gleich
Reduktion: Otto = Diesel, k = m = g, io < ao, 2010 = 2020
Reduktion des Luftwiderstands um 30 Prozent
Anteile: k = 0, übrige gleich
Reduktion: Otto = Diesel, m = g, io < ao, 2010 = 2020

Benzindirekteinspritzung (GDI), Downsizing, Abgasturbolader (ATL)

Anteile: 2010 < 2020, 2010: k = m = g, 2020 k > m = g
Reduktion: k = m = g, io > ao, 2010 = 2020

Start-Stop-Automatik

Anteile: alle gleich
Reduktion: nur io, alle gleich

Getriebe (automatisierte Schaltgetriebe (ASG), stufenloses Getriebe (Continously Variable Transmission, CVT)

Anteile: alle gleich
Reduktion: io > ao, übrige alle gleich

Hybride: Milder Hybrid, Vollparallel(misch)hybrid

Milder Hybrid
Anteile: Otto = Diesel, k = 0, m > g, 2010 < 2020
Reduktion: Otto > Diesel, m = g, io > ao, 2010 = 2020
Vollparallel(misch)hybrid
Anteile: Otto = Diesel, k = 0, m < g, 2010 < 2020
Reduktion: Otto > Diesel, m = g, io > ao, 2010 = 2020

Konzept-PKW
Konzepthybrid-PKW

Konzept-PKW
Anteile: Otto = Diesel, k = m = g, 2010 = 0
Reduktion: Otto = Diesel, k = m = g, io > ao
Konzepthybrid-PKW
Anteile: Otto = Diesel, k = m = g, 2010 = 0
Reduktion: Otto = Diesel, k = m = g, io > ao

H_2-Brennstoffzellen-PKW

Anteile: k. A. (Einführung 2020 ff.)
Reduktion: k = m = g, io > ao

Die folgende Tabelle 66 ist in vier Zeilenblöcke gegliedert. Jeder der Blöcke – bzw. im Falle des zweiten Blocks jeder Unterblock – ist nach Antriebsarten (Otto- und Dieselmotor) und Bezugsjahren (Basis und zukünftige bzw. nur zukünftige) differenziert. Im Folgenden werden lediglich die übrigen Differenzierungen bzw. die Verknüpfungen erläutert.

Fahrleistungsanteile: Der Block enthält, bezogen auf die Gesamtnutzungsdauer der Neuzulassungen der Bezugsjahre, die Fahrleistungsanteile der Größenklassen und Straßenkategorien bzw. Fahrzyklen (innerorts/außerorts). Die Anteile der Größenklassen beziehen sich direkt auf die Gesamtfahrleistung der Neuzulassungen, die der Straßenkategorien auf die Summen der jeweiligen Größenklasse.

Anteile an Neuzulassungen und Reduktionsraten: Der Block enthält für die einzelnen betrachteten Maßnahmen und Maßnahmenbündel deren Anteil an den jeweiligen Neuzulassungsjahrgängen sowie ihre Reduktionsraten bezogen auf die Neuzulassungen des Basisjahres. Die Anteile und Reduktionsraten sind differenziert nach Größenklassen, die Reduktionsraten zusätzlich nach Straßenkategorien bzw. Fahrzyklen (innerorts/außerorts).

Die letzte Spalte enthält die gewichtete mittlere Reduktionsrate über alle Größenklassen und Straßenkategorien unter Berücksichtigung der Verbreitung der jeweiligen Maßnahme in den einzelnen Größenklassen und den Fahrleistungen in den einzelnen Größenklassen und Straßenkategorien (Daten im Block „Fahrleistungsanteile“). Diese aggregierte Größe illustriert den Effekt von Anwendungsbreite und Fahrleistungsanteilen auf spezifische Reduktionsraten; sie stellt quasi die „wirksame Reduktionsrate“ dar.

Tabelle 66

Fahrzeugseitige Reduktionspotenziale: Fahrleistungsanteile, Anteile an Neuzulassungen, spezifische Reduktionen (Basis: 2004) und mittlere Kraftstoffverbräuche

Pkw-Klasse	**klein**			**mittel**			**groß**			**alle**
Fahrleistungsanteile										
	Pkw-Klasse	**Fahrzyklus**		**Pkw-Klasse**	**Fahrzyklus**		**Pkw-Klasse**	**Fahrzyklus**		
		io	**ao**		**io**	**ao**		**io**	**ao**	
Otto 2004	*31 %*	*32 %*	*68 %*	*55 %*	*29 %*	*71 %*	*13 %*	*22 %*	*78 %*	
Diesel 2004	*1 %*	*32 %*	*68 %*	*66 %*	*29 %*	*71 %*	*33 %*	*27 %*	*73 %*	
Otto 2010	*33 %*	*30 %*	*70 %*	*53 %*	*27 %*	*73 %*	*14 %*	*20 %*	*80 %*	
Otto 2020	*34 %*	*28 %*	*73 %*	*50 %*	*24 %*	*76 %*	*15 %*	*18 %*	*82 %*	
Diesel 2010	*3 %*	*30 %*	*70 %*	*65 %*	*27 %*	*73 %*	*32 %*	*25 %*	*75 %*	
Diesel 2020	*5 %*	*28 %*	*73 %*	*64 %*	*24 %*	*76 %*	*31 %*	*22 %*	*78 %*	
Anteile an Neuzulassungen und Änderungsraten										
	Anteil	**Änderung**		**Anteil**	**Änderung**		**Anteil**	**Änderung**		**Änderung**
	an NZ	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**mittel**
Euro 5										
Otto 2010	*100 %*	*1,0 %*	*1,0 %*	*100 %*	*1,0 %*	*1,0 %*	*100 %*	*1,0 %*	*1,0 %*	*1,0 %*
Otto 2020	*100 %*	*1,0 %*	*1,0 %*	*100 %*	*1,0 %*	*1,0 %*	*100 %*	*1,0 %*	*1,0 %*	*1,0 %*
Diesel 2010	*100 %*	*1,0 %*	*1,0 %*	*100 %*	*3,0 %*	*3,0 %*	*100 %*	*3,0 %*	*3,0 %*	*2,9 %*
Diesel 2020	*100 %*	*1,0 %*	*1,0 %*	*100 %*	*3,0 %*	*3,0 %*	*100 %*	*3,0 %*	*3,0 %*	*2,9 %*

noch Tabelle 66

Pkw-Klasse	klein			mittel			groß			alle
Anteile an Neuzulassungen und Änderungsraten										
	Anteil	**Änderung**		**Anteil**	**Änderung**		**Anteil**	**Änderung**		**Ände-rung**
	an NZ	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**mittel**
allgemeine Motorenentwicklung										
Otto 2010	100 %	- 3,5 %	- 3,5 %	100 %	- 3,5 %	- 3,5 %	100 %	- 3,5 %	- 3,5 %	- 3,5 %
Otto 2020	100 %	- 6,0 %	- 6,0 %	100 %	- 6,0 %	- 6,0 %	100 %	- 6,0 %	- 6,0 %	- 6,0 %
Diesel 2010	100 %	- 6,5 %	- 6,5 %	100 %	- 6,5 %	- 6,5 %	100 %	- 6,5 %	- 6,5 %	- 6,5 %
Diesel 2020	100 %	- 9,0 %	- 9,0 %	100 %	- 9,0 %	- 9,0 %	100 %	- 9,0 %	- 9,0 %	- 9,0 %
Anteile an Neuzulassungen und Änderungsraten										
	Anteil	**Änderung Reduktion**		**Anteil**	**Änderung**		**Anteil**	**Änderung**		**Ände-rung**
	an NZ	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**mittel**
Reduktion des Fahrzeuggewichts inkl. Sekundäreffekte										
Otto 2010	50 %	- 4,0 %	- 4,0 %	50 %	- 4,0 %	- 4,0 %	50 %	- 4,0 %	- 4,0 %	- 2,0 %
Otto 2020	100 %	- 5,0 %	- 5,0 %	75 %	- 5,0 %	- 5,0 %	75 %	- 5,0 %	- 5,0 %	- 4,2 %
Diesel 2010	50 %	- 4,0 %	- 4,0 %	50 %	- 4,0 %	- 4,0 %	50 %	- 4,0 %	- 4,0 %	- 2,0 %
Diesel 2020	100 %	- 5,0 %	- 5,0 %	75 %	- 5,0 %	- 5,0 %	75 %	- 5,0 %	- 5,0 %	- 3,8 %
Reduktion des Rollwiderstands										
Otto 2010	50 %	- 3,0 %	- 2,5 %	50 %	- 3,0 %	- 2,5 %	50 %	- 3,0 %	- 2,5 %	- 1,3 %
Otto 2020	75 %	- 3,5 %	- 3,0 %	75 %	- 3,5 %	- 3,0 %	75 %	- 3,5 %	- 3,0 %	- 2,3 %
Diesel 2010	50 %	- 3,0 %	- 2,5 %	50 %	- 3,0 %	- 2,5 %	50 %	- 3,0 %	- 2,5 %	- 1,3 %
Diesel 2020	75 %	- 3,5 %	- 3,0 %	75 %	- 3,5 %	- 3,0 %	75 %	- 3,5 %	- 3,0 %	- 2,3 %
Reduktion des Luftwiderstands (– 10 %)										
Otto 2010	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	- 0,9 %
Otto 2020	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	- 0,9 %
Diesel 2010	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	- 0,9 %
Diesel 2020	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	50 %	- 1,0 %	- 2,0 %	- 0,9 %
Reduktion des Luftwiderstands (– 30 %)										
Otto 2010	–	–	–	5 %	- 3,0 %	- 6,0 %	5 %	- 3,0 %	- 6,0 %	- 0,2 %
Otto 2020	–	–	–	5 %	- 3,0 %	- 6,0 %	5 %	- 3,0 %	- 6,0 %	- 0,2 %
Diesel 2010	–	–	–	5 %	- 3,0 %	- 6,0 %	5 %	- 3,0 %	- 6,0 %	- 0,3 %
Diesel 2020	–	–	–	5 %	- 3,0 %	- 6,0 %	5 %	- 3,0 %	- 6,0 %	- 0,3 %

noch Tabelle 66

Pkw-Klasse	**klein**			**mittel**			**groß**			**alle**
Anteile an Neuzulassungen und Änderungsraten										
	Anteil	**Änderung Reduktion**		**Anteil**	**Änderung**		**Anteil**	**Änderung**		**Ände-rung**
	an NZ	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**mittel**
Benzindirekteinspritzung (GDI), „downsizing“, Abgasturbolader (ATL)										
Otto 2010	25 %	- 15,0 %	- 5,0 %	25 %	- 15,0 %	- 5,0 %	25 %	- 15,0 %	- 5,0 %	- 1,9 %
Otto 2020	90 %	- 15,0 %	- 5,0 %	50 %	- 15,0 %	- 5,0 %	50 %	- 15,0 %	- 5,0 %	- 4,8 %
Diesel 2010	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Diesel 2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Start-Stop-Automatik										
Otto 2010	50 %	- 5,0 %	0,0 %	50 %	- 5,0 %	0,0 %	50 %	- 5,0 %	0,0 %	- 0,7 %
Otto 2020	50 %	- 5,0 %	0,0 %	50 %	- 5,0 %	0,0 %	50 %	- 5,0 %	0,0 %	- 0,6 %
Diesel 2010	50 %	- 5,0 %	0,0 %	50 %	- 5,0 %	0,0 %	50 %	- 5,0 %	0,0 %	- 0,7 %
Diesel 2020	50 %	- 5,0 %	0,0 %	50 %	- 5,0 %	0,0 %	50 %	- 5,0 %	0,0 %	- 0,6 %
Getriebe (automatisierte Schaltgetriebe, ASG, stufenloses Getriebe (Continously Variable Transmission, CVT)										
Otto 2010	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	- 1,5 %
Otto 2020	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	- 1,5 %
Diesel 2010	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	- 1,5 %
Diesel 2020	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	50 %	- 6,0 %	- 2,0 %	- 1,5 %
milder Hybrid										
Otto 2010	–	–	–	10 %	- 30,0 %	- 10,0 %	5 %	- 30,0 %	- 10,0 %	- 0,9 %
Otto 2020	–	–	–	30 %	- 30,0 %	- 10,0 %	15 %	- 30,0 %	- 10,0 %	- 2,5 %
Diesel 2010	–	–	–	10 %	- 15,0 %	- 5,0 %	5 %	- 15,0 %	- 5,0 %	- 0,6 %
Diesel 2020	–	–	–	30 %	- 15,0 %	- 5,0 %	15 %	- 15,0 %	- 5,0 %	- 1,8 %
Vollparallel(misch)hybrid										
Otto 2010	–	–	–	5 %	- 45,0 %	- 20,0 %	10 %	- 45,0 %	- 20,0 %	- 1,1 %
Otto 2020	–	–	–	15 %	- 45,0 %	- 20,0 %	30 %	- 45,0 %	- 20,0 %	- 3,1 %
Diesel 2010	–	–	–	5 %	- 30,0 %	- 15,0 %	10 %	- 30,0 %	- 15,0 %	- 1,2 %
Diesel 2020	–	–	–	15 %	- 30,0 %	- 15,0 %	30 %	- 30,0 %	- 15,0 %	- 3,5 %
Konzept										
Otto 2010	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Otto 2020	1 %	- 50,0 %	- 33,3 %	1 %	- 50,0 %	- 33,3 %	1 %	- 50,0 %	- 33,3 %	- 0,4 %
Diesel 2010	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Diesel 2020	1 %	- 50,0 %	- 33,3 %	1 %	- 50,0 %	- 33,3 %	1 %	- 50,0 %	- 33,3 %	- 0,4 %

noch Tabelle 66

Pkw-Klasse	klein			mittel			groß			alle
Anteile an Neuzulassungen und Änderungsraten										
	Anteil	**Änderung Reduktion**		**Anteil**	**Änderung**		**Anteil**	**Änderung**		**Ände-rung**
	an NZ	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**an NZ**	**io**	**ao**	**mittel**
Konzepthybrid										
Otto 2010	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Otto 2020	*1 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*1 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*1 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*- 0,5 %*
Diesel 2010	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Diesel 2020	*1 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*1 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*1 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*- 0,5 %*
H_2-Brennstoffzellen-Pkw										
2020 ff.	*0 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*0 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*0 %*	*- 66,6 %*	*- 40,0 %*	*0,0 %*

Gesamtherstellung: H. Heenemann GmbH & Co., Buch- und Offsetdruckerei, Bessemerstraße 83–91, 12103 Berlin
Vertrieb: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, Amsterdamer Str. 192, 50735 Köln, Telefon (02 21) 97 66 83 40, Telefax (02 21) 97 66 83 44
ISSN 0722-8333